

ESTUDO DOS EFEITOS DA COMPOSIÇÃO E DAS DIMENSÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE AGREGADOS LEVES

EDMAR FELIZ BORGES MARTINS

(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de
Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

Vogais: Prof^a. Doutora Cristina Ribeiro

Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues

Dezembro – 2010

ESTUDO DOS EFEITOS DA COMPOSIÇÃO E DAS DIMENSÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS E AGREGADOS LEVES

RESUMO

Analisa-se neste trabalho os efeitos da composição e das dimensões no comportamento mecânico das argamassas poliméricas de agregados leves.

A motivação para este estudo surgiu da necessidade de investigação do comportamento mecânico das argamassas poliméricas à base de agregados leves, em especial granulado de cortiça e de borracha. Esta motivação é acrescida pela necessidade de desenvolver argamassas poliméricas de baixo custo, sendo esta, uma das principais limitações da sua utilização. Daí, o interesse na utilização de granulados de cortiça ou de borracha que permitam reduzir o custo final do produto mantendo algumas das suas vantagens.

O trabalho desenvolvido baseia-se essencialmente na análise experimental. Caracterizaram-se os materiais utilizados como ligantes nas argamassas poliméricas (resinas epoxídicas) e analisou-se experimentalmente o comportamento à flexão e à compressão monotónica das argamassas desenvolvidas, variando a geometria dos provetes, as composições dos agregados (4 tipos) e as resinas (2 tipos).

SIZE AND COMPOSITION EFFECTS ON THE MECHANICAL
BEHAVIOUR OF POLYMERIC MORTARS WITH LIGHTWEIGHT
AGGREGATES

ABSTRACT

The present dissertation studies the size and composition effects on the mechanical behavior of polymeric mortars with lightweight aggregates.

The motivation for this study arose from the need to research the mechanical behaviour of polymeric mortars with lightweight aggregates - in the present case, rubber and cork. Besides, the need to develop better polymeric mortars constitutes another objective of this study. However, due to high cost of traditional polymeric mortars, lightweight aggregates were used. In this way, some advantages of polymeric mortars were maintained at the same time that their costs were reduced.

Most of this work is based essentially on experimental analysis. The materials which were used as binders in polymeric mortars were characterized. The polymeric mortars were tested by using different aggregates. The analysis was made by testing the behaviour under monotonic compression and bending of the developed mortars, varying the geometry of the specimens, the aggregate composition (4 types) and the epoxy resins (2 types).

PALAVRAS CHAVE

Argamassas Poliméricas

Resina Epoxídica

Polímeros

Cortiça

Borracha

Acções Monotónicas

Efeitos de Escala

Efeitos da Composição

Comportamento Mecânico

Análise Experimental

KEY WORDS

Polymeric Mortars

Epoxy Resin

Polymer

Cork

Rubber

Monotonic Actions

Size Effect

Composition Effects

Mechanical Behaviour

Experimental Analysis

AGRADECIMENTOS

Esta tese foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), sendo a parte experimental realizada no Laboratório de Estruturas do DEC (LabDEC). A estas instituições agradeço os meios colocados à minha disposição.

A todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho desejo expressar o meu mais profundo agradecimento.

Ao Professor Doutor Carlos Chastre Rodrigues, meu orientador científico, pelo interesse e acompanhamento que me dedicou, pelos conhecimentos que me transmitiu e pelo ensinamento e revisão crítica.

Ao Hugo Sousa, pela importante ajuda na preparação dos provetes, preparação dos equipamentos, montagem do sistema de ensaios, realização dos ensaios, e pela amizade e interesse manifestado na troca de impressões.

Aos Senhores Gaspar e o Jorge, pela ajuda no corte dos provetes, preparação e montagem dos equipamentos do sistema de ensaios.

Manifesto igualmente o meu reconhecimento às empresas que deram o seu contributo no fornecimento dos materiais:

- SIKA, pela cedência da resina epoxy ICOSIT KC 220/60.
- MC-BAUCHEMIE, pela cedência da resina epoxy MC-DUR 1390 VK.
- RECIPNEU, pela cedência de agregados de borracha.
- FABRICOR, pela cedência de agregados de cortiça;

Por fim, o maior agradecimento apresento-o aos meus pais e os meus irmãos, pelo apoio e incentivo que sempre me dispensaram ao longo destes anos. Ao meu pai, queria ainda dedicar-lhe esta tese.

Índice

RESUMO	I
ABSTRACT	III
PALAVRAS CHAVE.....	V
KEY WORDS	VII
AGRADECIMENTOS	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XXI
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - <i>POLÍMEROS</i>	2
I - TERMOPLÁSTICOS	2
II - TERMOENDURECÍVEIS	3
III - ELASTÓMEROS.....	3
1.1.1 - RESINAS EPOXÍDICAS	4
1.1.1.1 - PROPRIEDADES DAS RESINAS EPOXÍDICAS	6
1.1.1.2 - APLICAÇÕES CORRENTES	7
1.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS	7
1.3 - <i>OBJECTIVOS</i>	8
1.4 - <i>ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</i>	8
2 - ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS	11
2.1 - <i>A INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL</i>	11
2.2 - <i>A INVESTIGAÇÃO A NÍVEL INTERNACIONAL</i>	21
3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	27
3.1 - <i>APRESENTAÇÃO DOS MODELOS</i>	27
3.2 - <i>PARÂMETROS ANALISADOS</i>	30
3.3 - <i>PREPARAÇÃO DOS PROVETES</i>	31
3.3.1 - PREPARAÇÃO DOS MOLDES	31
3.3.2 - PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS	32
3.3.3 - RECTIFICAÇÃO DOS PROVETES.....	34
3.4 - <i>SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO</i>	34
3.4.1 - EQUIPAMENTOS DE ENSAIO E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	34
3.4.2 - INSTRUMENTAÇÃO.....	35
3.4.3 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	36
4 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	37
4.1 - <i>RESINA EPOXÍDICA</i>	37
4.2 - <i>CORTIÇA</i>	42
4.2.1 - ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CORTIÇA	42
4.2.2 - PROPRIEDADES DA CORTIÇA.....	43
4.2.3 - GRANULADO DE CORTIÇA.....	44
4.3 - <i>BORRACHA</i>	49
4.3.1 - PROCESSO DE TRATAMENTO DOS GRANULADOS DE BORRACHA EFECTUADOS PELA RECIPNEU	49
5 - EFEITO DA COMPOSIÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS	55
5.1 - <i>ENSAIOS DE FLEXÃO</i>	55
5.1.1 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA MC E CORTIÇA.....	57
5.1.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA IC E CORTIÇA.....	58

5.1.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA MC E BORRACHA	61
5.1.4 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA IC E BORRACHA	63
5.1.5 - ANÁLISE DE RESULTADOS – ENSAIOS DE FLEXÃO	66
5.1.5.1 - EFEITO DO TIPO DE RESINA – ENSAIO DE FLEXÃO	70
5.1.5.2 - EFEITO DO TIPO DE AGREGADO – ENSAIO DE FLEXÃO	74
5.2 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO MONOTÓNICA	76
5.2.1 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA IC E CORTIÇA	76
5.2.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA MC E CORTIÇA	78
5.2.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE RESINA IC COM BORRACHA	80
5.2.4 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE RESINA MC COM BORRACHA	82
5.2.5 - ANÁLISE DE RESULTADOS – ENSAIOS DE COMPRESSÃO MONOTÓNICA	85
5.2.5.1 - EFEITO DO TIPO DE RESINA – COMPRESSÃO MONOTÓNICA	89
5.2.5.2 - EFEITO DOS AGREGADOS – COMPRESSÃO MONOTÓNICA	93
6 - EFEITO DAS DIMENSÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS	
POLIMÉRICAS.....	95
6.1 - EFEITOS DA VARIAÇÃO DAS ALTURAS - PROJETOS CILÍNDRICOS (D=46 MM)	96
6.1.1 - RESINA IC	97
6.1.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – IC85A	99
6.1.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – IC70DC	102
6.1.4 - RESINA MC	104
6.1.5 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS - MC85A	107
6.1.6 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC70DC	109
6.1.7 - ANÁLISE DE RESULTADOS	112
6.2 - EFEITO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS PROJETOS	113
6.2.1 - RESINA MC	113
6.2.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC70DC (D=98 MM)	116
6.2.3 - ANÁLISE DE RESULTADOS	119
6.3 - EFEITOS DA FORMA	122
6.3.1 - RESINA MC	123
6.3.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC85A	126
6.3.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC70DC	128
6.3.4 - ANÁLISE DE RESULTADOS	131
7 - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	135
7.1 - SÍNTESE GLOBAL	136
7.2 - CONCLUSÕES	137
7.3 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	140
RREFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1-Pormenor de ensaios à flexão e à compressão de argamassas poliméricas com aparas de madeira [5].....	12
Fig. 2.2- a) Resistência à flexão a) e à compressão b) em função das percentagens em peso de agregado orgânico [5].....	12
Fig. 2.3- Resistência à flexão a) e à compressão b) em função das percentagens em peso de aparas de madeira [10].....	13
Fig. 2.4- Resistência à flexão das argamassas poliméricas em função da temperatura [8].....	14
Fig. 2.5-Provetes cilíndricos e prismáticos de argamassa polimérica com cortiça e pormenores de ensaios de flexão e de compressão monotónica [6].....	15
Fig. 2.6- Resistência à compressão e à flexão de argamassas poliméricas em função das percentagens em volume de cortiça [6].	15
Fig. 2.7- Provetes prismáticos de argamassa polimérica com cortiça e borracha [9].....	16
Fig. 2.8- Tensão - flecha do ensaio de flexão [9].	17
Fig. 2.9- Tensão - deslocamento do ensaio à compressão monotónica [9].	17
Fig. 2.10- Diagrama de Tensão – extensão do ensaio de flexão [11].....	18
Fig. 2.11- Diagrama de Tensão - extensão do ensaio à compressão monotónica das argamassas poliméricas e a sua comparação o diagrama de betão simples [11].....	18
Fig. 2.12- Diagrama de Tensão - extensão do ensaio à compressão monotónica e cíclica dos provetes [11].....	19
Fig. 2.13- Efeitos de ciclos de humidade na resistência à flexão e à compressão da argamassa polimérica com base em resinas epoxídicas [12].	19
Fig. 2.14- Efeitos de ciclos de temperatura na resistência à flexão e à compressão da argamassa polimérica com base em resinas epoxídicas [12].....	20
Fig. 2.15- Efeitos de ciclos de temperatura na resistência à flexão e à compressão da argamassa polimérica com base em resinas de poliéster [12].	20
Fig. 2.16- Efeito da cura na resistência à compressão e à flexão [15].....	21
Fig. 2.17- Efeito da temperatura na resistência à compressão e à flexão [15].	22
Fig. 2.18- Tensão – extensão das argamassas com 9% (em peso) da resina [16]	23
Fig. 2.19- Tensão – extensão das argamassas com 100% (em peso) dos agregados (natural e reciclados) [16].....	23
Fig. 2.20- Efeito das cinzas volantes na resistência à flexão [19].....	24

Fig.2.21- Efeito do tipo de resina e cinzas volantes de concentração na resistência à compressão axial [21].	25
Fig. 3.1- Geometria dos provetes ensaiados na 2ª e 3ª série.	31
Fig. 3.2- Moldes utilizados na preparação dos modelos	32
Fig.3.3- Dispositivo mecânico de mistura	33
Fig.3.4- Sistemas de ensaios utilizados para a tracção por flexão	34
Fig.3.5- Sistemas de ensaios utilizados para a compressão monotónica e sistema de aquisição de dados.	35
Fig.3.6- Pormenor de colocação de transdutores de deslocamentos:	36
Fig.4.1- Resinas epoxídicas MC- DUR 1390 VK e ICOSIT KC 220/60.	38
Fig.4.2- Pormenores de ensaio à flexão e os respectivos modos de rotura das resinas.	39
Fig.4.3- Diagrama tensão – deformação do ensaio de flexão das resinas MC e IC.	39
Fig.4.4- Diagrama tensão – deformação - resinas MC e IC.	41
Fig. 4.5- Pormenores de ensaios à compressão, e respectivos modos de rotura: a) Provetes de resina MC e b) Provetes de resina IC.	41
Fig.4.6- Corte transversal de um sobreiro [37].	42
Fig.4.7- Granulometria de cortiça (Pó)	45
Fig.4.8- Granulometria de cortiça (1-2 mm)	46
Fig.4.9- Curvas granulométricas dos agregados de cortiça: 1-2 mm e pó	47
Fig.4.11- Fragmentação e extracção de aros.	49
Fig.4.12- Túnel criogénico	50
Fig.4.13- Moinhos de martelos	50
Fig.4.14- Aspecto do produto final mais fino (< 0,6 mm) e mais grosso (cerca de 4 mm).	50
Fig.4.15-Granulometria de borracha (DC8000).	51
Fig.4.16- Granulometria de borracha (RA1435).	52
Fig.4.17- Curvas granulométricas dos granulados de borrachas: RA 1435 e DC 8000	53
Fig.5.1- Diagrama tensão-deformação específico para materias plásticos [10]	56
Fig.5.2- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-A.	57
Fig.5.3- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-E.	57

Fig.5.4- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-A.....	58
Fig.5.5- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-E.	59
Fig.5.6- Pormenores de ensaios de flexão de provetes de argamassas poliméricas com agregados de cortiça e respectivos modos de rotura.....	60
Fig.5.7- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-DC....	61
Fig.5.8- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-RA....	61
Fig.5.9- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, IC-DC.....	63
Fig.5.10- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, IC-RA....	63
Fig.5.11- Pormenores de ensaios de flexão das argamassas poliméricas com agregados de borracha e respectivos modos de rotura.	65
Fig.5.12- Resistências à tracção por flexão das argamassas poliméricas, com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).	66
Fig.5.13- Extensão de rotura à tracção por flexão, das argamassas poliméricas, com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).	67
Fig.5.14- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas, com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).	67
Fig.5.15- Resistências à tracção por flexão das argamassas poliméricas, com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).	68
Fig.5.16- Extensão de rotura à tracção por flexão, das argamassas poliméricas, com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).	69
Fig.5.17- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas, com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).	69
Fig.5.18- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à tracção por flexão das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).	71
Fig.5.19- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à tracção por flexão das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).	71
Fig.5.20- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).	72
Fig.5.21- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).	72
Fig.5.22- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).	73
Fig.5.23- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).	73

Fig.5.25- Extensão de rotura. Efeito dos agregados.	75
Fig.5.26- Módulo de Elasticidade. Efeito dos agregados.	75
Fig.5.27- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-A.	76
Fig.5.28- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-E.....	77
Fig.5.29- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas MC-A.	78
Fig.5.30- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas MC-E.	78
Fig.5.31- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-DC.....	80
Fig.5.32- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-RA.....	80
Fig.5.33- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-DC.	82
Fig.5.34- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-RA.	82
Fig.5.35- Pormenores dos ensaios à compressão monotónica e respectivos modos de rotura.	84
Fig.5.36- Resistência à compressão das argamassas poliméricas com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).....	85
Fig.5.37- Extensão de rotura à compressão das argamassas poliméricas com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).....	86
Fig.5.38- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).....	86
Fig.5.39- Resistência à compressão das argamassas poliméricas com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA). ...	87
Fig.5.40- Extensão de rotura à compressão das argamassas poliméricas com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).....	88
Fig.5.41- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).....	88
Fig.5.42- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à compressão das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).	90
Fig.5.43- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à compressão das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).	90
Fig.5.44- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura à compressão das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).	91
Fig.5.45- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura à compressão das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).	91

Fig.5.46- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).....	92
Fig.5.47- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).....	92
Fig.5.48- Efeito do tipo de agregado na resistência à compressão das argamassas com resinas MC ou IC.....	93
Fig.5.49- Efeito do tipo de agregado na extensão de rotura das argamassas com resinas MC ou IC.....	94
Fig.5.50- Efeito do tipo de agregado no módulo de elasticidade das argamassas com resinas MC ou IC.....	94
Fig.6.1- Provetes de argamassas poliméricas, com cinco alturas ($H/D=1/5$; $1/2$; 1 ; 2 e 4). Forma cilíndrica, $D=46$ mm (A) e $D=98$ mm (C); Forma prismática da secção (40X40) mm (B).....	95
Fig.6.2- Provetes de argamassas poliméricas: IC85A [a], IC70DC [b],MC85A [c] e MC70DC [d].	96
Fig.6.3- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes de resina IC, $D=46$ mm.	97
<i>Fig.6.4- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – Provetes de resina IC.</i>	<i>98</i>
<i>Fig.6.5- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – Provetes de resina IC.</i>	<i>98</i>
<i>Fig.6.6- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – Provetes de resina IC.</i>	<i>99</i>
Fig.6.7- Diagramas tensão - extensão axial - Provetes IC85A, $D=46$ mm.	99
<i>Fig.6.8- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – IC85A.</i>	<i>100</i>
<i>Fig.6.9- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – IC85A.</i>	<i>101</i>
<i>Fig.6.10- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – IC85A.....</i>	<i>101</i>
Fig.6.11- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes IC70DC, $D=46$ mm.....	102
<i>Fig.6.12- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) - IC70DC.</i>	<i>103</i>
<i>Fig.6.13- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) - IC70DC.</i>	<i>103</i>
<i>Fig.6.14- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) - IC70DC.</i>	<i>104</i>
Fig.6.15- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC, $D=46$ mm.	105
<i>Fig.6.16- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) - MC100.</i>	<i>105</i>
<i>Fig.6.17- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) - MC100.....</i>	<i>106</i>

<i>Fig.6.18- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) - MC100</i>	106
<i>Fig.6.19- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC85A, D=46 mm.....</i>	107
<i>Fig.6.20- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC85A.</i>	108
<i>Fig.6.21- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC85A.</i>	108
<i>Fig.6.22- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC85A.</i>	109
<i>Fig.6.23- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC70DC, D=46 mm.</i>	109
<i>Fig.6.24- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC70DC.</i>	110
<i>Fig.6.25- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC70DC.....</i>	111
<i>Fig.6.26- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC70DC.....</i>	111
<i>Fig.6.27- Provetes de resina MC, D=98 mm. Pormenores do ensaio à compressão monotónica.....</i>	113
<i>Fig.6.28- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC100, D=98 mm.....</i>	114
<i>Fig.6.29- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC100, D=98 mm..</i>	115
<i>Fig.6.30- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC100, D=98 mm.</i>	115
<i>Fig.6.31- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC100, D=98 mm.</i>	116
<i>Fig.6.32 - Provetes MC70DC, D=98 mm. Pormenores do ensaio à compressão monotónica.</i>	116
<i>Fig.6.33- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC70DC, D=98 mm.</i>	117
<i>Fig.6.34- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC70DC.</i>	118
<i>Fig.6.35- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC70DC.....</i>	118
<i>Fig.6.36- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC70DC.....</i>	119
<i>Fig.6.37- Provetes de resina MC, D=46 mm e 98 mm.</i>	119
<i>Fig.6.38- Tensão de rotura – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm).</i>	120
<i>Fig.6.39- Extensão de rotura – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm).....</i>	121
<i>Fig.6.40- Módulo de elasticidade – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm).....</i>	121
<i>Fig.6.41- Provetes de argamassas poliméricas MC85A, MC70DC e MC100.....</i>	122

Fig.6.42- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC100.....	123
<i>Fig.6.43- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC100..</i>	<i>124</i>
<i>Fig.6.44- Extensão de rotura - relação de proporção (H/B) – MC100.</i>	<i>125</i>
<i>Fig.6.45- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/B) – MC100.</i>	<i>125</i>
Fig.6.46- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC85A.....	126
<i>Fig.6.47- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/B) – MC85A..</i>	<i>127</i>
<i>Fig.6.48- Extensão de rotura - relação de proporção (H/B) – MC85A.</i>	<i>127</i>
<i>Fig.6.49- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/B) – MC85A.</i>	<i>128</i>
Fig.6.50- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC70DC.....	128
<i>Fig.6.51- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/B) – MC70DC.</i>	<i>129</i>
<i>Fig.6.52- Extensão de rotura - relação de proporção (H/B) – MC70DC.</i>	<i>130</i>
<i>Fig.6.53- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/B) – MC70DC.</i>	<i>130</i>
Fig.6.54- Provetes de argamassas poliméricas MC85A, MC70DC e MC100.	131
Fig.6.55- Tensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).....	132
Fig.6.56- Extensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).....	133
Fig.6.57- Módulo de elasticidade – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Formulações das argamassas poliméricas [9].	16
Tabela 2.2- Formulações utilizadas por Jo, Park et al. [16]	22
Tabela 3.1- Características dos provetes ensaiados na 1ª série.	28
Tabela 3.2- Características dos modelos ensaiados na 2ª série. Estudo dos efeitos de escala em provetes de secção circular (D = 46 mm).	29
Tabela 3.3- Características dos modelos ensaiados na 2ª série. Estudo dos efeitos de escala em provetes de secção circular (D = 98 mm).	29
Tabela 3.4- Características dos modelos ensaiados na 3ª série. Estudo dos efeitos de escala em provetes de secção rectangular.	30
Tabela 4.1- Comparação das propriedades das resinas e do betão [33].	37
Tabela 4.2- Características das resinas MC-DUR 1390 VK e ICOSIT KC220/60.	38
Tabela 4.3- Resultados dos dos ensaios de flexão das resinas MC e IC.	40
Tabela 4.4- Resultados dos ensaios à compressão monotónica das resinas MC e IC.	41
Tabela 4.5- Comparação das características fornecidas pelo fabricante com as ensaiadas.	42
Tabela 4.6- Características físicas e mecânicas da cortiça. Adaptado do Dossier Info Cortiça [36]	44
Tabela 4.7- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro para o agregado de cortiça 1-2 mm.	47
Tabela 4.8- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro para o pó de cortiça.	47
Tabela 4.9- Parâmetros caracterizados na análise granulométrica.	48
Tabela 4.10- Características das borrachas (DC8000 e RA1435) [42, 43]	51
Tabela 4.11- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Granulado de borracha -RA1435).	52
Tabela 4.12- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Pó de borracha-DC8000).	53
Tabela 4.13- Parâmetros caracterizados na análise granulométrica.	53
Tabela 5.1- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas de resina MC com agregados de cortiça (A e E).	58
Tabela 5.2- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas IC com agregados de cortiça (A e E).	59

Tabela 5.3- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas MC com agregados de borracha (DC e RA).	62
Tabela 5.4- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas IC-DC, RA.	64
Tabela 5.5- Comparação das características mecânicas (f_{pct} , ϵ_{pct} e E) das argamassas poliméricas, com a resina MC.....	68
Tabela 5.6- Comparação das características mecânicas (f_{pct} , ϵ_{pct} e E), das argamassas poliméricas, com a resina IC.....	70
Tabela 5.7- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas IC com os agregados de cortiça (A ou E).	77
Tabela 5.8- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas MC com os agregados de cortiça (A ou E).	79
Tabela 5.9- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas IC com os agregados de borracha (DC ou RA).	81
Tabela 5.10- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas MC com os agregados de borracha (DC ou RA).	83
Tabela 5.11- Comparação das características mecânicas (f_r , ϵ_r e E) das argamassas poliméricas com a resina IC.	87
Tabela 5.12- Comparação das características mecânicas (f_r , ϵ_r e E) das argamassas poliméricas, com a resina MC.....	89
Tabela 6.2- Resultados dos ensaios à compressão da resina IC.....	98
Tabela 6.3- Resultados dos ensaios à compressão – IC85A.....	100
Tabela 6.4- Resultados dos ensaios à compressão - IC70DC.....	102
Tabela 6.5- Resultados dos ensaios à compressão – MC100.....	105
Tabela 6.6- Resultados dos ensaios à compressão – MC85A.....	107
Tabela 6.7- Resultados dos ensaios à compressão – MC70DC.....	110
Tabela 6.8- Geometria dos provetes.	113
Tabela 6.9- Resultados dos ensaios à compressão – MC100, D=98 mm.	114
Tabela 6.10- Resultados dos ensaios à compressão – MC70DC.....	117
Tabela 6.11- Tensão de rotura – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm).....	120
Tabela 6.12- Extensão de rotura – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm).....	121
Tabela 6.13- Módulo de elasticidade – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm)	122

Tabela 6.14- Alturas e relação de proporção (H/B) dos provetes (B=40 mm).....	122
Tabela 6.15- Resultados dos ensaios à compressão – MC100.	124
Tabela 6.16- Resultados dos ensaios à compressão – MC85A.	126
Tabela 6.17- Resultados dos ensaios à compressão – MC70DC.....	129
Tabela 6.18- Tensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas de secção 40x40 mm e cilindro – D=46 mm).	132
Tabela 6.19- Extensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).....	133
Tabela 6.20- Módulo de elasticidade – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).....	134

Capítulo 1

1 - INTRODUÇÃO

Os novos materiais baseados em polímeros têm tido uma atenção especial nos últimos trinta anos, existindo cada vez mais interesse na investigação deste tipo de material dada a sua vasta gama de aplicações em engenharia civil.

A argamassa polimérica é um material compósito no qual a ligação dos agregados é assegurada por um polímero orgânico sintético, usualmente as resinas epoxídicas ou de poliéster. A utilização de resina epoxídica como ligante é mais corrente nas situações em que se pretendem melhores desempenhos mecânicos.

Dada a grande resistência mecânica da argamassa polimérica em comparação com as argamassas de cimento Portland, poder-se-ão obter ganhos em termos da quantidade de material, colocando a argamassa polimérica numa base competitiva com a argamassa convencional em certas aplicações especiais. Normalmente estas argamassas apresentam uma resistência à compressão e à flexão superior à do betão convencional mas têm um módulo de elasticidade inferior.

A resistência mecânica e química bem como as propriedades físicas das argamassas poliméricas são muito dependentes da natureza do polímero de ligação. As propriedades da matriz polimérica são altamente dependentes do tempo e da temperatura à qual se encontra exposta.

Na reparação e reforço de estruturas as argamassas de base poliméricas têm sido utilizadas em especial devido à sua elevada resistência mecânica, permeabilidade muito baixa, tempo de cura acelerado, elevada durabilidade, excelente comportamento à fadiga, elevada resistência a ataques ambientais e a produtos corrosivos. A grande desvantagem das argamassas poliméricas é o seu custo, nomeadamente o custo da resina. Um dos interesses na utilização de granulados de cortiça ou de borracha, para além da maior leveza, é o de permitir reduzir o custo final do produto mantendo algumas das vantagens das argamassas poliméricas.

1.1 - POLÍMEROS

Os polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular relativa (10 a 1.000.000 g / mol) [1]. À reacção de formação dos polímeros dá-se o nome de polimerização.

Os polímeros são macromoléculas obtidas da associação de pequenas moléculas (os monómeros). O número de vezes que determinado grupo se repete na cadeia das macromoléculas dá-se o nome de grau de polimerização. Esta característica está relacionada com as propriedades dos polímeros, designadamente com o facto de estes se encontrarem no estado líquido (com uma maior ou menor viscosidade) ou no estado sólido. Quanto menor for o grau de polimerização menor será a viscosidade.

Em função das suas características mecânicas os polímeros podem ser divididos em três grandes grupos: i) termoplásticos; ii) termoendurecíveis e iii) elastómeros.

O facto de se formar um polímero de um ou de outro grupo está ligado à noção de funcionalidade, f , do monómero, ou seja, o número de ligações covalentes que cada uma das pequenas moléculas pode estabelecer. Para os termoplásticos $f = 2$ e para termoendurecíveis $f > 2$ [2].

I - TERMOPLÁSTICOS

Os polímeros termoplásticos têm a sua estrutura constituída por macromoléculas dispostas linearmente entre si, ligadas por forças intermoleculares. São também chamados plásticos, e são os mais encontrados no mercado. Este grupo de polímero pode ser fundido diversas vezes,

alguns podem até dissolver-se em vários solventes. É possível reciclar um polímero termoplástico, característica bastante desejável actualmente.

Quando se fornece energia, por exemplo, sob a forma de calor, a um termoplástico, destroem-se as forças intermoleculares ficando este mole. Porém não perde a estrutura linear das macromoléculas. Uma vez arrefecido, o material volta a ter a sua estrutura restabelecida. Estes materiais são propícios para serem moldados a quente.

II - TERMOENDURECÍVEIS

Os polímeros termoendurecíveis têm uma estrutura macromolecular tridimensional, são muito estáveis a variações de temperatura e uma vez endurecidos, já não se fundem com o aumento de temperatura.

Ao contrário dos polímeros termoplásticos, os termoendurecíveis, devido à sua estrutura tridimensional, são pouco afectados pelo calor ou pelos solventes. Quando se lhes fornece energia a estrutura exibe uma fraca mobilidade e, se esta for suficiente, acaba-se por destruir a estrutura do polímero. Quanto maior for a funcionalidade, mais densa será a cadeia, maior será a resistência ao calor e aos diluentes e maior será a dureza e a resistência dos polímeros termoendurecíveis.

III - ELASTÓMEROS

A propriedade predominante dos elastómeros é o seu comportamento elástico após deformação em compressão ou tracção. É possível, por exemplo, alongar um elastómero até dez vezes o seu comprimento inicial, e após remoção da deformação aplicada, verificar que ele voltará, sob circunstâncias ideais, à forma e comprimento iniciais.

Este grupo de polímeros não são fundíveis, mas apresentam alta elasticidade, e não são rígidos como os termoendurecíveis.

1.1.1 - RESINAS EPOXÍDICAS

As resinas epoxídicas foram descobertas em 1891 pelo norueguês Lindeman, datando de 1934 a primeira patente deste produto. A exploração industrial deste tipo de material começou em 1946 quando a empresa CIBA comercializou uma cola, sob a designação de ARALDIT, que permitia a união de diversos materiais [3].

A utilização das resinas epoxídicas na construção terá começado como material auxiliar, utilizando nas ligações de elementos constituídos por outros materiais. Hoje em dia esta função mantém-se graças ao seu poder aderente, porém poderá afirmar-se que o emprego crescente de resinas epoxídicas como ligantes dos compósitos de FRP, de argamassas, betões, revestimentos e injeções de fissura do betão, entre outros, lhe conferirá já o papel de material de construção autónomo.

As resinas epoxídicas são materiais plásticos, constituídas por moléculas gigantes, as macromoléculas, obtidas da associação de pequenas moléculas, os monómeros. As macromoléculas constituem os polímeros e à reacção de formação dos polímeros dá-se o nome de reacção de polimerização.

As resinas epoxídicas são obtidas da mistura de dois ou mais componentes. Normalmente os componentes separados apresentam-se sob a forma de líquidos viscosos. Uma vez misturados os componentes, inicia-se uma reacção exotérmica que, depois de terminar, dá origem a um material sólido. A proporção da mistura dos componentes (resina epoxídica e endurecedor) e as suas características têm grande influência nas propriedades do produto final.

A mistura da resina epoxídica e endurecedor, nas proporções certas, dá origem a um polímero termoendurecível, tendo portanto uma estrutura macromolecular tridimensional. A reacção de polimerização entre a resina e o endurecedor não liberta produtos de reacção, razão pela qual endurecem com uma retracção praticamente desprezável.

As reacções de endurecimento são exotérmicas e aumentam a sua velocidade com o aumento da temperatura. Depois de misturada a resina com o endurecedor dá-se o início à reacção de polimerização e, ao fim de um determinado tempo, a mistura adquire uma consistência tal que já não pode ser aplicada. A este intervalo de tempo chama-se tempo de utilização ou *pot-life*.

Este é condicionado pela temperatura ambiente. Conforme a temperatura de aplicação seja maior ou menor que a especificada, mais curto ou mais longo será o *pot-life*. A formulação pode mesmo não endurecer para temperaturas demasiado baixas.

As proporções de resina epoxídica e de endurecedor devem sempre ser respeitadas e também a sua mistura ser muito bem executada. Caso contrário a cadeia tridimensional formada não ficará completa, com as consequentes perdas das propriedades do produto final.

Existem diversos tipos de resinas e endurecedores os quais permitem obter uma vasta gama de produtos finais, conforme as propriedades procuradas. Esta gama pode ainda ser aumentada adicionando outros componentes, designados por aditivos ou modificadores de formulação. Indicam-se a seguir os aditivos mais correntes, a sua função e como actuam nas formulações.

i) Diluentes

Os diluentes permitem diminuir a viscosidade, facilitando a sua aplicação. Em geral alteram também outras características como por exemplo aumentando o *pot-life*, diminuindo a resistência mecânica e química.

ii) Flexibilizadores

Permitem aumentar a flexibilidade. Usam-se nos casos em que seja necessário diminuir as tensões devidas a deslocamentos impostos, melhorando assim o comportamento face a choques térmicos. Na construção utilizam-se essencialmente para diminuir as tensões provocadas pelos diferentes coeficientes de dilatação térmica das resinas epoxídicas e dos betões. A utilização de flexibilizadores provoca a redução da resistência mecânica e química do produto final.

iii) Pigmentos

Os pigmentos permitem dar cor as formulações, podendo obter-se toda a gama de cores, desde o preto ao branco.

iii) Cargas

Utilizam-se para diminuir a custo da aplicação e para melhorar ou modificar algumas das propriedades das resinas. Podem ser de diversos tipos, sendo em geral inertes, isto é, não entram na reacção.

Uma das grandes vantagens da utilização de cargas é a possibilidade de se poderem utilizar maiores massas de formulação epoxídica. O uso de cargas também diminui a percentagem de resina na formulação diminuindo a temperatura de reacção e aumentando o *pot-life*.

1.1.1.1 - PROPRIEDADES DAS RESINAS EPOXÍDICAS

As propriedades das resinas epoxídicas podem variar bastante, conforme o tipo de formulação adoptada. De um modo geral os fabricantes fazem acompanhar os seus produtos de fichas técnicas que especificam essas propriedades.

Apresentam-se a seguir os valores correntes das propriedades das resinas epoxídicas. Nalguns casos fazem-se comparações com idênticas propriedades de betão.

- ✓ **Resistência mecânica:** varia muito em função do tipo de mistura. A resistência tracção varia entre 15 e 50 MPa e a resistência à compressão entre 20 e 200 MPa.
- ✓ **Viscosidade:** varia muito, segundo o tipo de utilização. Para injeções em que se utilizam viscosidades mais baixas esta pode ser da ordem de 200 centipoises. Para revestimentos, por exemplo, pode variar entre 1000 e 1500 centipoises.
- ✓ **Aderência:** muito elevada, podendo mesmo ser superior à sua resistência a tracção.
- ✓ **Retracção:** muito baixa, em geral muito mais baixa que a do betão.
- ✓ **Resistência ao choque:** é muito elevada.
- ✓ **Módulo de elasticidade:** as resinas epoxídicas têm um comportamento não elástico, pelo que em cada caso será necessário saber como é definido o módulo de elasticidade e quais os seus limites de variação. O seu valor pode variar entre 0,5 GPa a 20 GPa, sendo geralmente, inferior ao do betão.
- ✓ **Extensão de rotura:** Pode variar entre 2 a 25%, sendo bastante superior ao do betão.
- ✓ **Resistência abrasão e ao desgaste:** muito grande e geralmente muito superior à do betão.
- ✓ **Fluência:** é bastante superior à do betão podendo, ser diminuída utilizando carga na sua formulação. A fluência aumenta com o aumento da temperatura.
- ✓ **Resistência aos agentes químicos:** exibem em geral excelente resistência ao ataque químico.

1.1.1.2 - APLICAÇÕES CORRENTES

Dadas as características das resinas epoxídicas que atrás se indicaram, podem apontar-se várias aplicações possíveis, como sejam: os revestimentos de protecção; as colagens entre elementos; as injeções de materiais fissurados ou porosos, a utilização em argamassas de reparação ou como ligante em argamassa polimérica e betão polimérico.

Para além das resinas epoxídicas, existe outros tipos de resinas, como por exemplo as resinas poliéster, acrílicas, de uretano entre outras. As resinas epoxídicas são as mais utilizadas na construção civil. As razões que levam a que as resinas epoxídicas sejam as mais aplicadas na construção em comparação com outros tipos de resinas são as seguintes:

- ✓ Suportam bem o meio alcalino, inevitável quando em contacto com o betão;
- ✓ Suportam bem as variações higrotérmicas do clima, quando aplicadas em obra;
- ✓ O tempo de endurecimento é regulável dentro dos limites exigidos em obra;
- ✓ Conservam relativamente bem ao longo do tempo as características iniciais.

1.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS

As resistências mecânicas das argamassas ou betões de ligante epoxy são normalmente superiores às conseguidas com o cimento. Variam consoante o tipo de resina epoxídica, da sua formulação e também do tipo e granulometria dos agregados. A resistência à compressão varia entre 10 e 160 MPa e a resistência tracção por flexão entre 5 e 45 MPa. A resistência à abrasão é 5 a 15 vezes superior à do betão convencional. A cura de uma argamassa polimérica ficará, completa em 24 horas e a retracção é quase nula. A sua aderência a praticamente todas as superfícies e a boa resistência aos agentes químicos são outras das características que valerá a pena referir.

Algumas aplicações deste tipo de argamassas são as seguintes:

- ✓ Reparações de estruturas em que seja necessário uma cura muito rápida, por exemplo, reparação de uma pista de aterragem de aeroportos, trabalhos marítimos realizados à maré;
- ✓ Reparações em pequenas espessuras, por exemplo, reposição de recobrimentos de armaduras em peças de betão armado, destacados por corrosão das armaduras;

- ✓ Selagem de ancoragens submetidas a elevados esforços de tracção com redução dos comprimentos de amarração;
- ✓ Execução e reparação de juntas em pontes e viadutos.

1.3 - OBJECTIVOS

O objectivo principal do presente trabalho consistiu em estudar os efeitos da composição e das dimensões no comportamento mecânico de argamassas poliméricas de agregados leves (granulado de cortiça ou de borracha).

Tendo em vista este objectivo desenvolveram-se as seguintes actividades:

- ✓ Pesquisa bibliográfica, elaborando uma síntese com as principais contribuições nesta área;
- ✓ Desenvolvimento de argamassas poliméricas de agregados leves;
- ✓ Caracterização mecânica dos materiais utilizados como ligantes nas argamassas poliméricas (resinas epoxídicas);
- ✓ Análise e caracterização experimental do comportamento à tracção por flexão e à compressão monotónica das argamassas desenvolvidas, variando a geometria dos provetes, as composições dos agregados (4 tipos) e as resinas utilizadas (2 tipos).

Em termos concretos este estudo implicou a realização de uma extensa campanha de ensaios, tendo-se executado 357 ensaios de provetes em compressão ou em flexão com oito tipos de formulações diferentes.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, incluindo a introdução e as conclusões, e encontra-se organizada de acordo com os objectivos definidos.

No capítulo 1 faz-se uma introdução. No capítulo 2 apresenta-se o estado actual do conhecimento. Mostram-se os principais desenvolvimentos realizados por diversos autores relativamente ao comportamento mecânico de argamassas poliméricas.

Apresenta-se no capítulo 3 o programa experimental com a metodologia do estudo. São descritos os modelos utilizados, os parâmetros estudados, os provetes a ensaiar e os sistemas de ensaio utilizados.

Apresenta-se no capítulo 4 a caracterização dos materiais. São testados experimentalmente os dois tipos de resinas utilizados.

No capítulo 5 apresenta-se o efeito da composição no comportamento mecânico da argamassa polimérica. Apresenta-se nesse capítulo os resultados dos ensaios experimentais de flexão e de compressão monotônica das argamassas poliméricas à base de cortiça e borracha.

No capítulo 6 apresenta-se o efeito das dimensões no comportamento mecânico de argamassa polimérica à base de agregados leves de cortiça ou de borracha.

No capítulo 7 apresenta-se as principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho e os desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

2 - ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS

A argamassa polimérica começou a ser desenvolvida nos anos 50, porém se tornou conhecida nos anos 70 [4]. Desde então vários têm sido os investigadores que se dedicaram a estudar o comportamento mecânico deste material.

Neste capítulo apresenta-se o estado actual do conhecimento através de referência aos trabalhos de diversos grupos de investigação que têm trabalhado quer em Portugal quer a nível internacional na área do comportamento mecânico das argamassas poliméricas.

2.1 - A INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL

A investigação na área de argamassas poliméricas tem tido um grande desenvolvimento em Portugal nos últimos anos. Destacando-se os trabalhos realizados por um grupo de investigadores da FEUP em colaboração com o INEGI. Apresentam-se a seguir algumas publicações destes trabalhos [5-9].

Em 2003, os investigadores **Ribeiro, Nóvoa et al.** [5] apresentaram um trabalho sobre comportamento mecânico das argamassas poliméricas à base de agregados orgânicos leves, neste caso em especial, granulado de cortiça e aparas de madeira. Realizaram ensaios de flexão e de compressão monotónica (Figura 2.1), com o objectivo de estudar a influência destes agregados no comportamento mecânico da argamassa polimérica. Concluíram destes ensaios que o comportamento mecânico da argamassa é muito afectado com a introdução

destes agregados (Figura 2.2), diminuindo substancialmente com o aumento da percentagem deste agrega. Contudo, na rotura apresenta um comportamento menos frágil com aumento da percentagem de agregado.

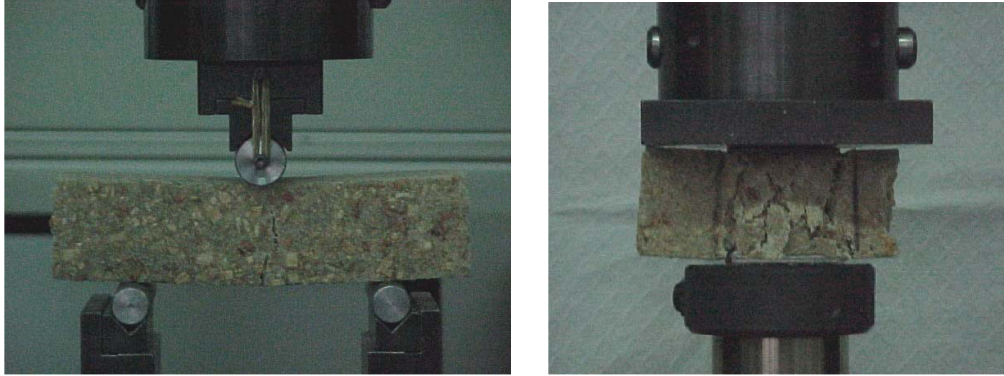


Fig. 2.1-Pormenor de ensaios à flexão e à compressão de argamassas poliméricas com aparas de madeira [5]

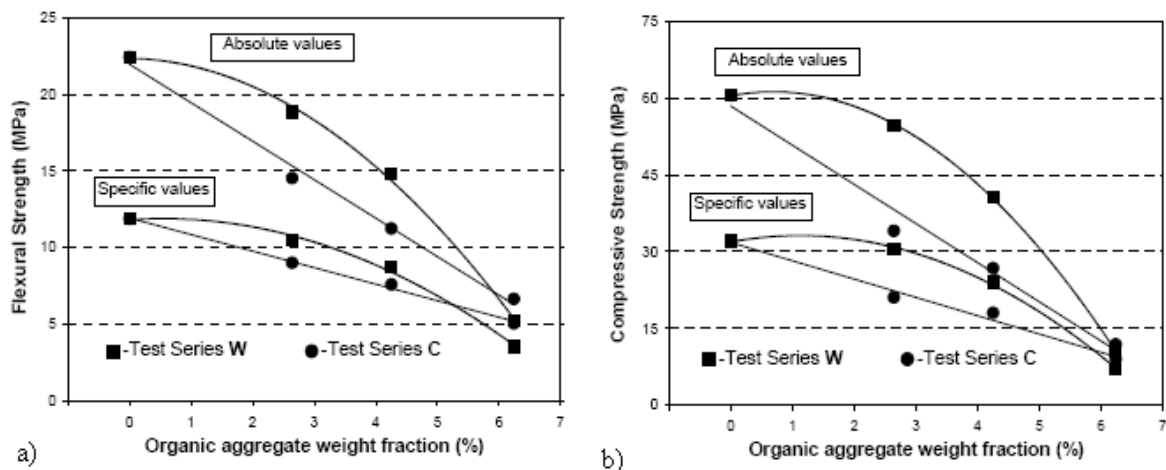


Fig. 2.2- a) Resistência à flexão a) e à compressão b) em função das percentagens em peso de agregado orgânico [5].

Em 2004, **Ribeiro, Nóvoa et al.** [7], apresentaram um outro estudo em que observaram a variação do comportamento mecânico da argamassa polimérica com a introdução de aparas de madeira e dois tipos de resinas (epoxy e polyester). Neste estudo, além da influência da fracção mássica de agregado (aparas de madeira) no comportamento mecânico da argamassa polimérica, os autores estudaram também a influência do tipo de resina (epoxy ou polyester). Concluíram que a resistência mecânica das argamassas é influenciada pela quantidade de aparas de madeira, diminuindo com o aumento destas. Quanto ao efeito do tipo de resina, constataram que as argamassas com resina epoxídica apresentam um melhor comportamento

mecânico do que a argamassa com resina de poliéster. Apresenta-se na Figura 2.3 um resumo dos resultados obtidos.

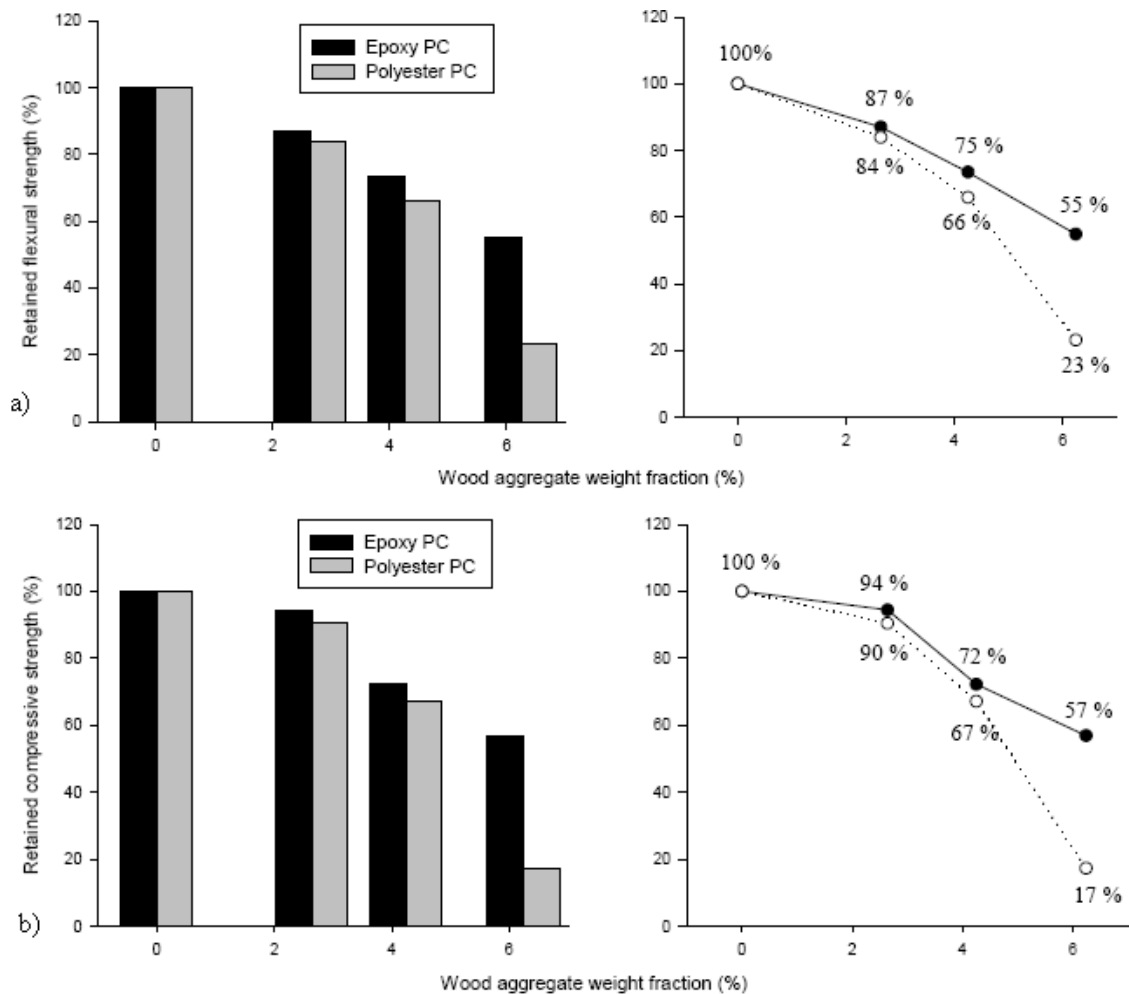


Fig. 2.3- Resistência à flexão a) e à compressão b) em função das percentagens em peso de aparas de madeira [10].

Em 2004, os mesmos investigadores **Ribeiro, Nóvoa et al.** [8] apresentaram um outro trabalho onde estudam a influência de diversas condições térmicas na resistência à flexão nos dois tipos de argamassas poliméricas (de resina epoxídica e de poliéster). Os provetes das argamassas poliméricas foram sujeitos a diversas condições térmicas: i) temperaturas constantes (entre -20 °C a 100 °C); ii) ciclos de fadiga térmica entre os 20°C e 100°C e iii) entre -10°C e 10°C. As argamassas foram ensaiadas à flexão. Destes ensaios os autores concluíram que a resistência à flexão das argamassas poliméricas estudadas é afectada pelas diversas condições de temperatura, diminuindo a resistência com o aumento da temperatura. Verificou-se que as argamassas de resinas epoxídicas são mais sensíveis à temperatura, em

especial para temperaturas elevadas e que os ciclos de temperatura não têm grande influência na resistência à flexão.

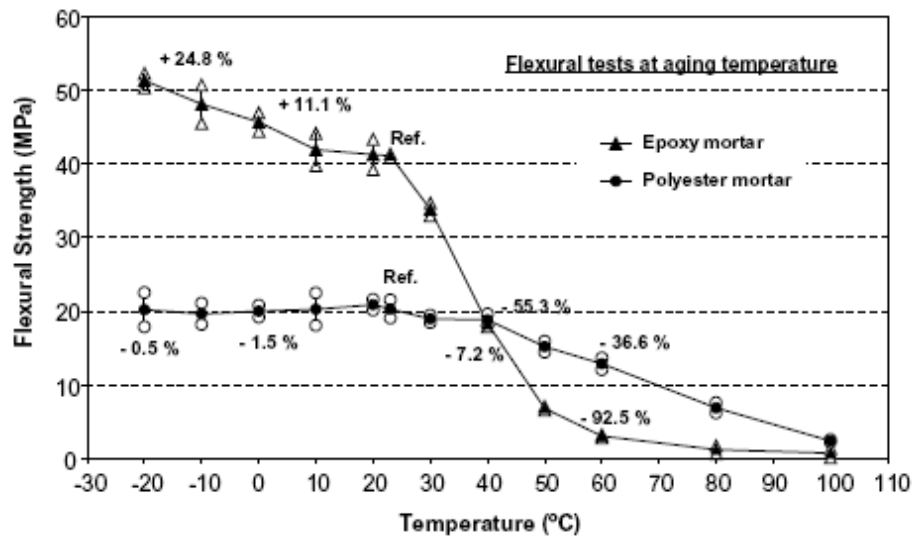


Fig. 2.4- Resistência à flexão das argamassas poliméricas em função da temperatura [8].

Nóvoa, Ribeiro et al. (2004) [6] investigaram o comportamento mecânico das argamassas poliméricas modificadas com cortiça. Neste estudo foram realizadas duas séries de testes, com diferentes fracções resinas/areia (em % de peso). Em cada série, foi introduzida cortiça em várias composições (0% a 45% do volume total). As argamassas foram testadas à temperatura ambiente à flexão e à compressão. Objectivo do estudo realizado foi analisar o efeito da cortiça no comportamento mecânico da argamassa polimérica. Como se pode observar na Figura 2.6, existe um decréscimo de resistência à medida que se incrementa a percentagem de cortiça da composição.



Fig. 2.5-Provetes cilíndricos e prismáticos de argamassa polimérica com cortiça e pormenores de ensaios de flexão e de compressão monotónica [6].

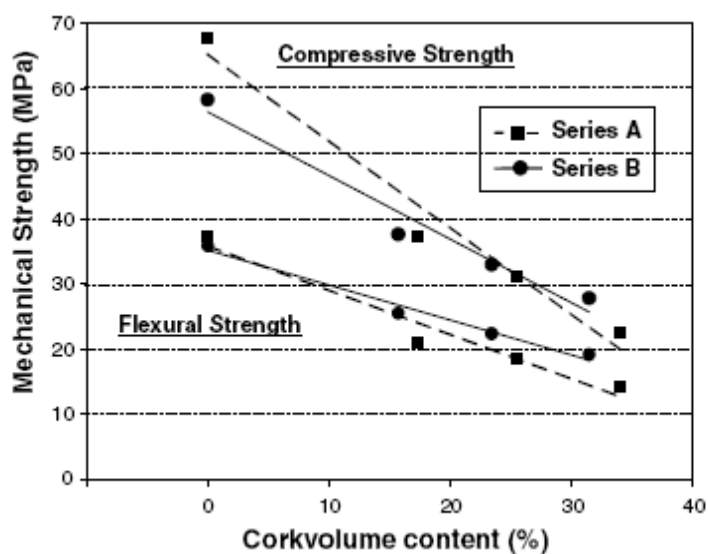


Fig. 2.6- Resistência à compressão e à flexão de argamassas poliméricas em função das percentagens em volume de cortiça [6].

Em 2005, Nóvoa, Ribeiro e Ferreira [9] publicaram um outro trabalho em que estudaram as argamassas poliméricas. Nesse estudo foram realizados diversas formulações em que foi substituída 25% da massa do agregado fino (areia) por agregados leves (borracha/cortiça). Na Tabela 2.1 mostram-se as formulações apresentadas.

Mortar		Replaced fraction of fine aggregate (fa)	Rubber:Cork (v/v)
Type	Code		
Base	R0C0	0	-
Modified	R1C0	0,25	100:00:00
	R3C1		75:25:00
	R1C1		50:50:00
	R1C3		25:75
	R0C1		0-100

Tabela 2.1- Formulações das argamassas poliméricas [9].

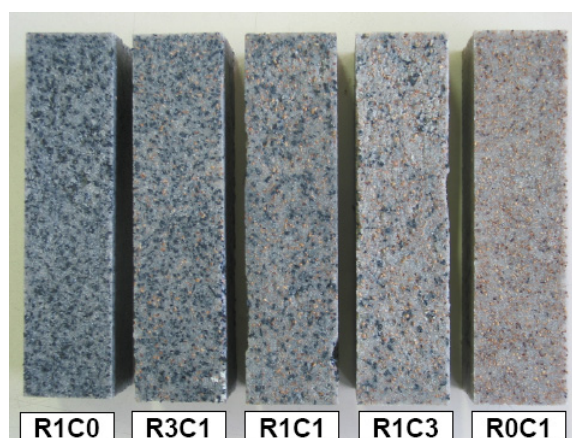


Fig. 2.7- Provetes prismáticos de argamassa polimérica com cortiça e borracha [9].

Os provetes de argamassa polimérica com cortiça e borracha foram ensaiados à flexão e à compressão à temperatura ambiente. Os autores constataram que a resistência mecânica das argamassas poliméricas diminuía com a adição destes tipos de agregados (borracha/cortiça). Tendo concluído que as argamassas que tinham apenas cortiça apresentavam uma maior resistência que aquelas que tinham mistura de borracha e cortiça ou só de borracha.

Apresentam-se nas Figuras 2.8 e 2.9, um resumo dos resultados deste estudo.

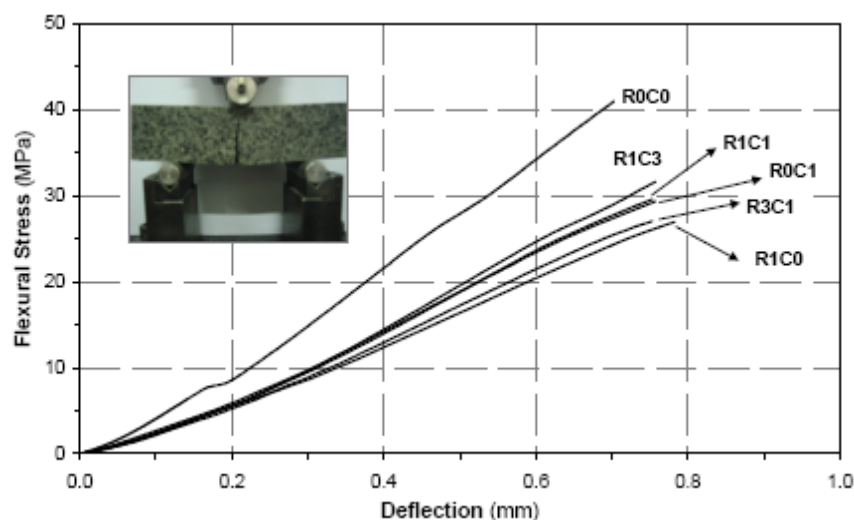


Fig. 2.8- Tensão - flecha do ensaio de flexão [9].

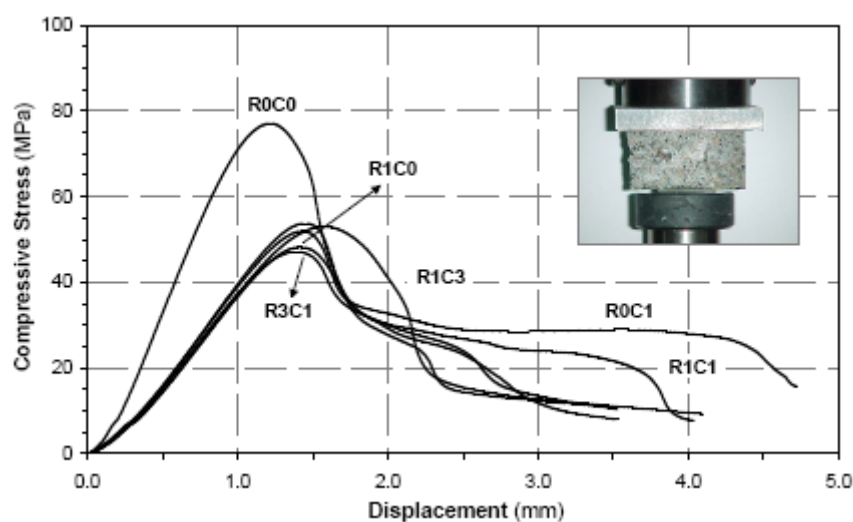


Fig. 2.9- Tensão - deslocamento do ensaio à compressão monotônica [9].

Apresenta-se a seguir alguns trabalhos realizados no DEC-FCT/UNL por investigadores do UNIC [11, 12].

Em 2007, Rodrigues e Silva [11] publicaram um estudo sobre o comportamento mecânico de betões poliméricos. Neste estudo foram produzidos diversos tipos de argamassas poliméricas com dois tipos de resinas epoxídicas (Icosit KC220/60 e Eposil 551) e usando como agregados areias siliciosas de diferentes tipos de granulometria. Foram preparadas as seguintes composições: A e B [13] com 20% de resina epoxídica (Eposil 551) e 80% de areia (SP 55); D com 33,3% de resina epoxídica (Icosit KC 220/60) e 66,6% de agregados de origem siliciosa com dimensões entre 0,1 a 4 mm, C (100% de resina Icosit KC 220/60) e E

(100% de resina Eposil 551). Dessas formulações foram preparados provetes de 160x40x40 mm³ os quais foram ensaiados à flexão e à compressão monotônica e cíclico.

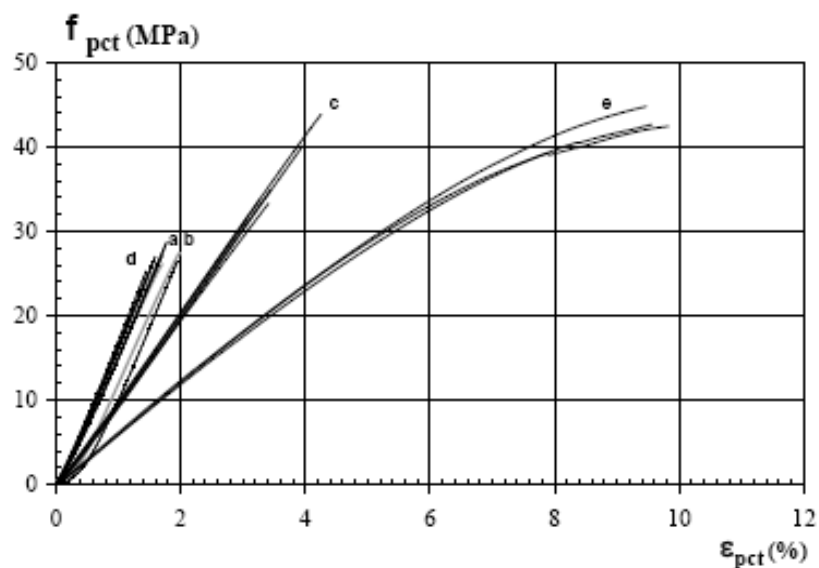


Fig. 2.10- Diagrama de Tensão – extensão do ensaio de flexão [11].

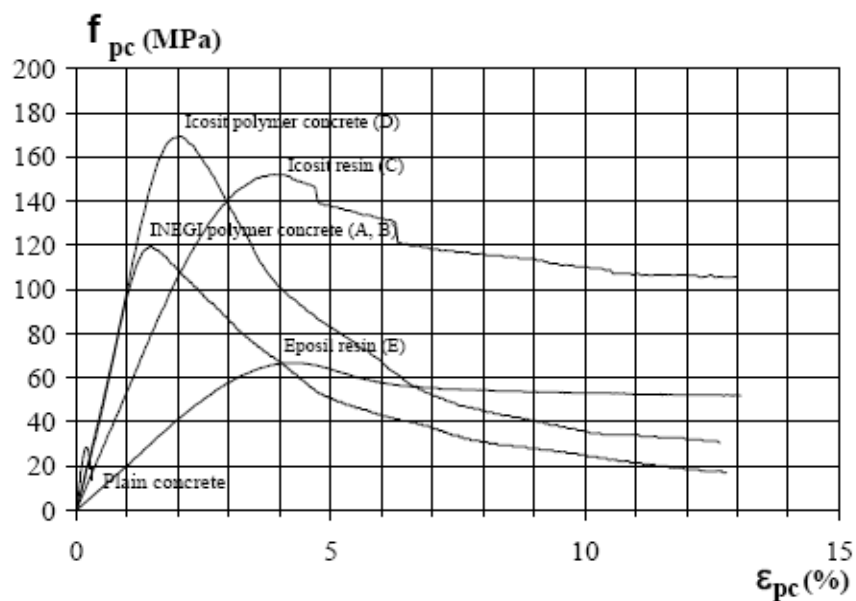


Fig. 2.11- Diagrama de Tensão - extensão do ensaio à compressão monotônica das argamassas poliméricas e a sua comparação o diagrama de betão simples [11].

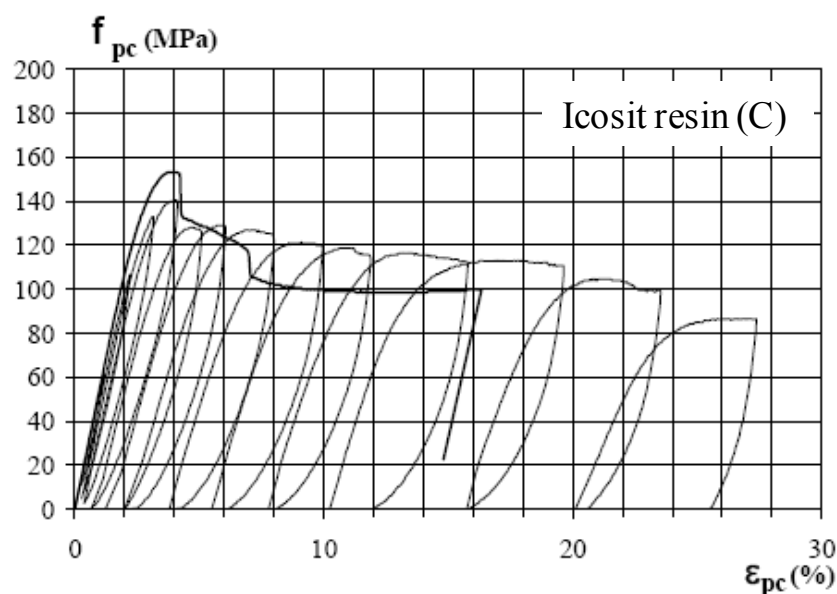


Fig. 2.12- Diagrama de Tensão - extensão do ensaio à compressão monotônica e cíclica dos provetes [11]

Em 2007, **Silva, Simão et al.** [12] publicaram um estudo no qual avaliaram a degradação de argamassas poliméricas com base em testes de envelhecimento acelerado. As argamassas poliméricas estudadas eram à base de resinas epoxídicas ou de poliéster. Essas argamassas foram submetidas a ciclos de humidade, térmicos e de nevoeiro salino e posteriormente ensaiados à compressão e à flexão. Quer à compressão, quer à flexão as argamassas apresentaram uma perda de resistência ao longo do envelhecimento (Figuras 2.13 a 2.15).

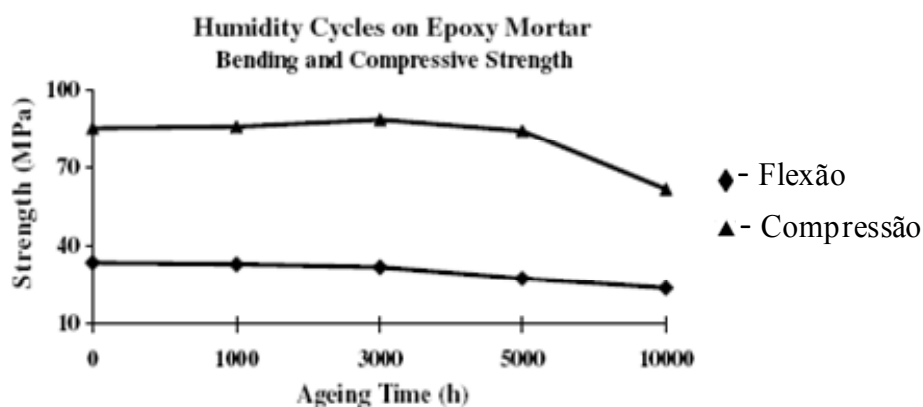


Fig. 2.13- Efeitos de ciclos de humidade na resistência à flexão e à compressão da argamassa polimérica com base em resinas epoxídicas [12].

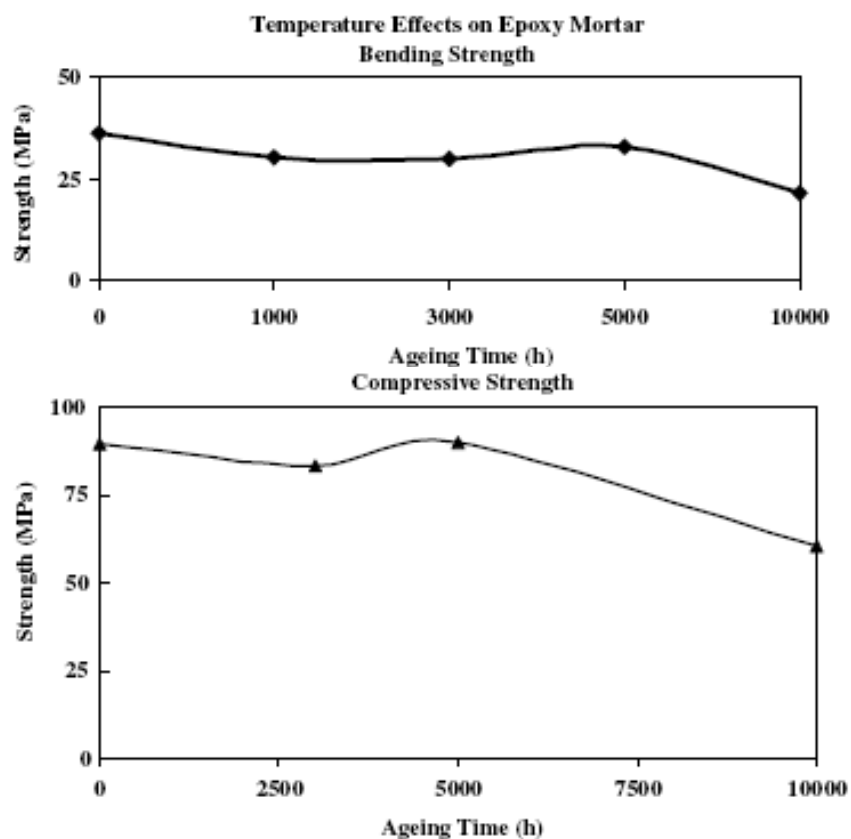


Fig. 2.14- Efeitos de ciclos de temperatura na resistência à flexão e à compressão da argamassa polimérica com base em resinas epoxídicas [12].

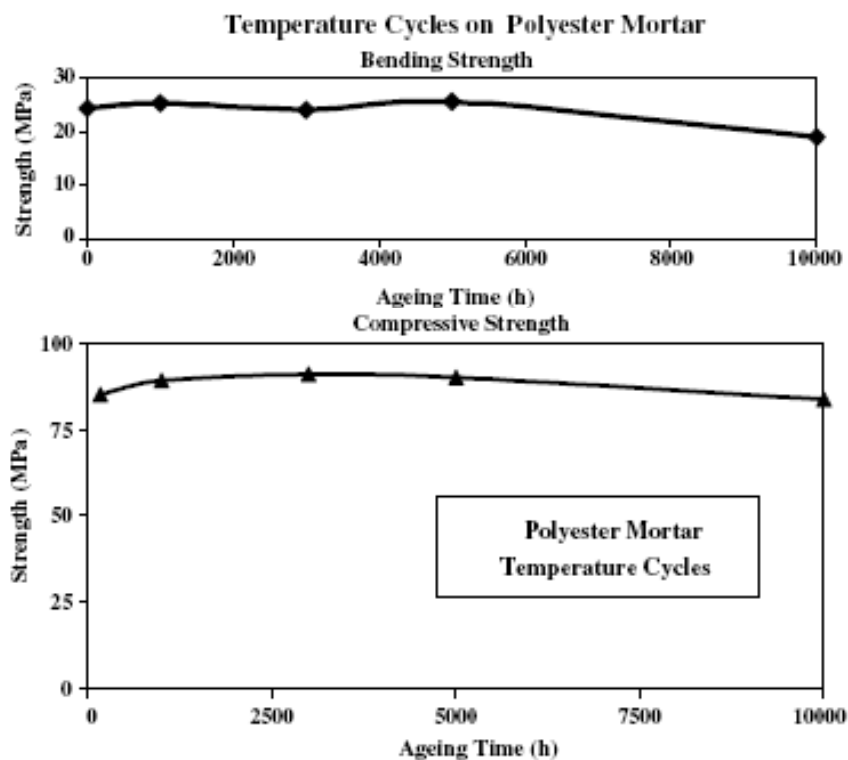


Fig. 2.15- Efeitos de ciclos de temperatura na resistência à flexão e à compressão da argamassa polimérica com base em resinas de poliéster [12].

2.2 - A INVESTIGAÇÃO A NÍVEL INTERNACIONAL

Em 1987, **Mani, Gupta et al.** [14] apresentaram um estudo em que compararam o comportamento mecânico de betões poliméricos com dois tipos de resinas (epoxídicas e poliéster), em ambos os casos com os mesmos tipos de agregados (quartzito britado e areia siliciosa). A comparação também é feita com um betão convencional (de cimento Portland). Realizaram vários testes onde estudaram a resistência à compressão, flexão, impacto, abrasão e a vários produtos químicos. Concluíram que os betões poliméricos, tanto de resina epoxídica como de poliéster, apresentam propriedades superiores ao betão convencional. Além disso, concluíram que os betões poliméricos com a resina epoxídica apresentam melhores propriedades.

Em 1996, **Rebeiz** [15] realizou um estudo sobre um betão polimérico com resina de poliéster não saturada com base em resíduos de PET (Polietileno tereftalato) reciclado. Neste trabalho realizaram-se vários testes de flexão e compressão, em provetes de betão polimérico com diferentes idades (até 28 dias) e diferentes temperaturas. Este estudo demonstrou que este tipo de betão pode atingir mais de 80% da sua capacidade resistente ao fim de um dia (Figura 2.16), uma vantagem importante em muitas aplicações estruturais. Quanto à sua resistência a altas temperaturas, observou-se uma perda significativa na resistência (Figura 2.17). No entanto, apesar desta perda, o material permanece bastante resistente quer à compressão quer à flexão, quando comparado com o betão de cimento Portland.

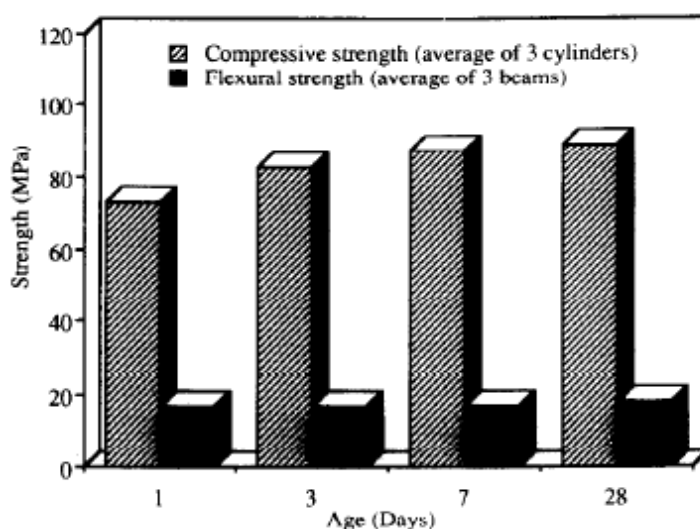


Fig. 2.16- Efeito da cura na resistência à compressão e à flexão [15].

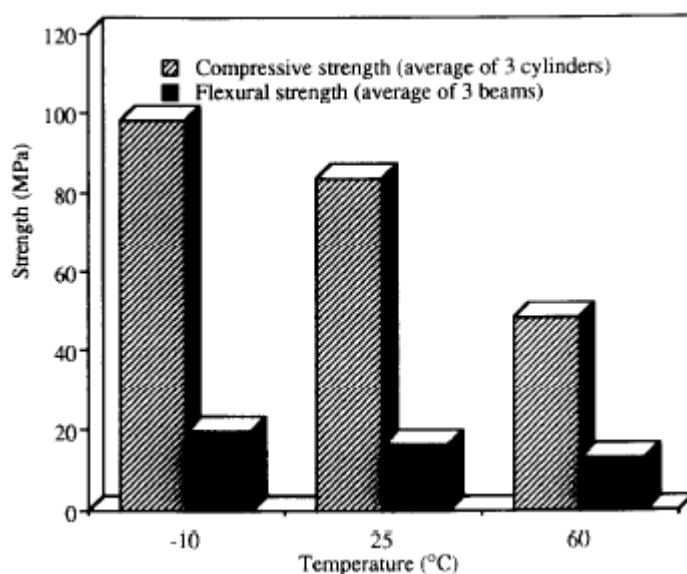


Fig. 2.17- Efeito da temperatura na resistência à compressão e à flexão [15].

Além do trabalho realizado por **Rebeiz** [15] sobre betão polimérico utilizando resina de poliéster com base em resíduos de PET, também os investigadores, **Jo, Park et al.** [16], em 2007, na Universidade de Hanyang, Seul, Coreia do Sul, estudaram o comportamento mecânico deste tipo de betão polimérico.

Nesse estudo foram realizados diversas formulações em que variaram as percentagens em peso da resina (9, 13 e 17) e utilizaram agregados naturais e reciclados de diferentes granulometrias grossos (\varnothing 9 mm) e finos (\varnothing 5 mm), variando as suas percentagens em peso. Na Tabela 2.2 mostram-se as formulações apresentadas.

Types	Changing factor (Resin Contents)		Aggregates; 82, 74, 66 (%)			
	Resin (%)	Filler (%)	Natural (%)		Recycled (%)	
			Coarse ($\leq 9\text{mm}$)	Fine ($\leq 5\text{mm}$)	Coarse ($\leq 9\text{mm}$)	Fine ($\leq 5\text{mm}$)
NA100-R#	9,13,17	9,13,17	100	100	0	0
NC50-R#			50	100	50	0
NC0-R#			0	100	100	0
NF50-R#			100	50	0	50
NF0-R#			100	0	0	100
NA50-R#			50	50	50	50
NA0-R#			0	0	100	100

Tabela 2.2- Formulações utilizadas por **Jo, Park et al.** [16]

Os autores constataram que a resistência mecânica diminuía a medida que aumentamos a percentagem dos agregados reciclados, tendo concluído que a resistência à compressão aumentava com o incremento da percentagem da resina. Apresentam-se nas Figuras 2.18 e 2.19, um resumo dos resultados deste estudo.

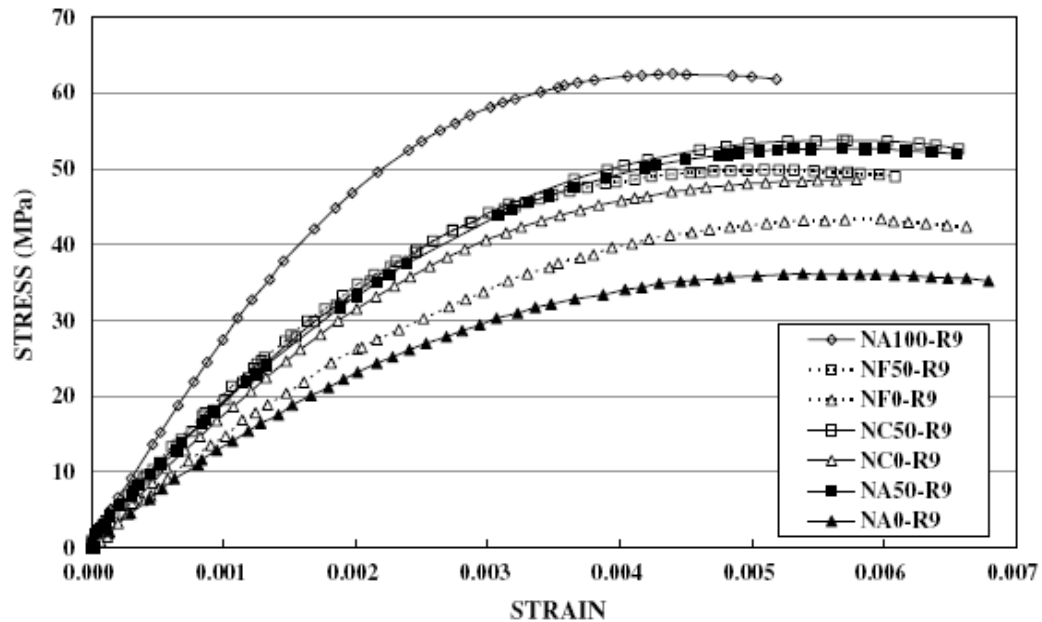


Fig. 2.18- Tensão – extensão das argamassas com 9% (em peso) da resina [16]

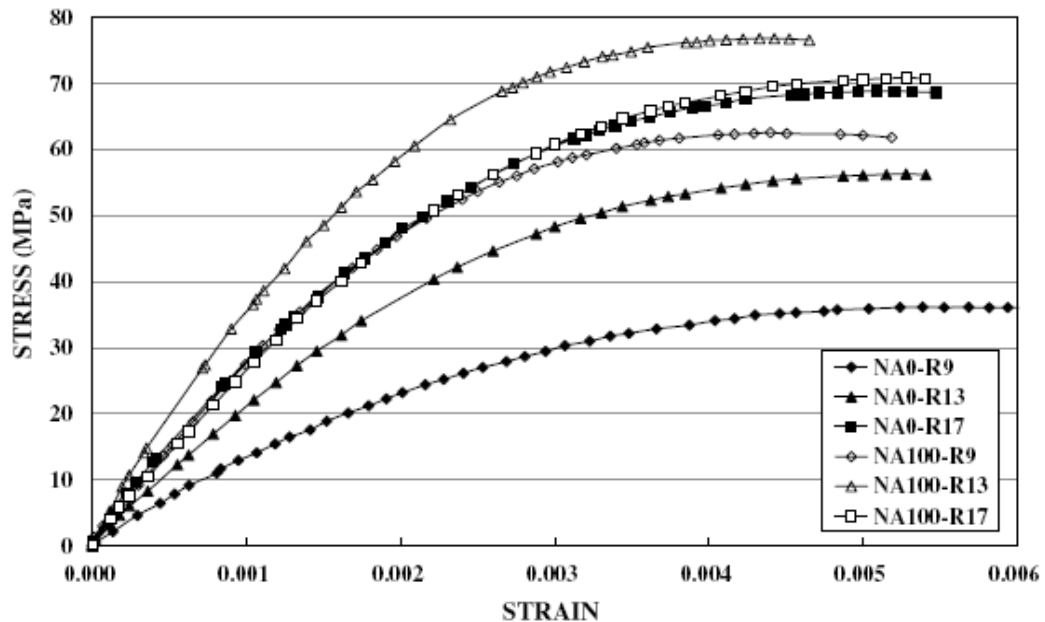


Fig. 2.19- Tensão – extensão das argamassas com 100% (em peso) dos agregados (natural e reciclados) [16]

Ainda em 2007, **Jo, Tae et al.** [17], **Mahdi, Khan, et al.** [18] realizaram diversos ensaios à compressão de argamassas poliméricas utilizando resina poliéster com base em resíduos de PET.

Varughese e Chaturvedi [19], em 1996, efectuaram um estudo com betões poliméricos baseadas em resina de poliéster. Utilizaram como agregado fino, areia do rio e cinzas volantes e como agregado grosso, utilizaram granito. O objectivo desse estudo foi saber o comportamento resistente do betão quando se substituía a areia do rio por cinzas volantes. Foram estudados parâmetros como a resistência à flexão, o tempo de cura e a absorção da água em função da percentagem em peso de cinzas volantes. Os autores concluíram que cinzas volantes podem substituir a areia, parcialmente ou na sua totalidade. Tendo verificado que para um nível superior a 75 % em peso de cinzas volantes, a mistura torna-se pouco trabalhável, o que provoca um declínio na sua resistência à flexão (Figura 2.20).

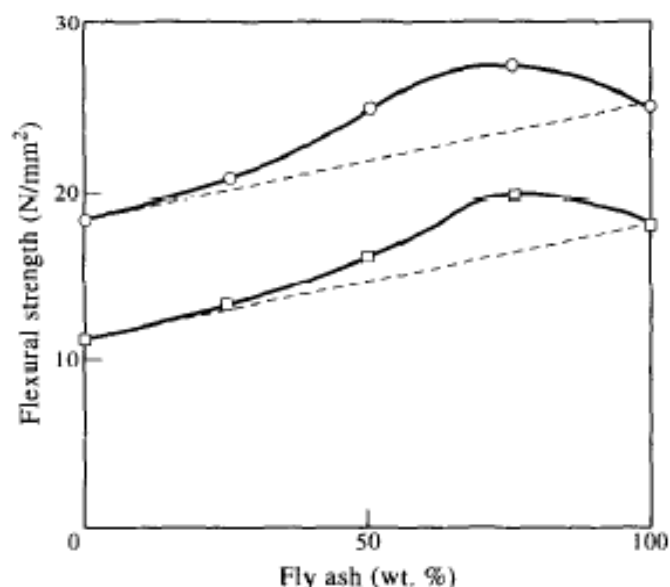


Fig. 2.20- Efeito das cinzas volantes na resistência à flexão [19].

Além dos autores referidos existem outros como **Gorninski, Dal Molin et al.** [20, 21], **Sofi et al** [22] e **Wu e Sun** [23] que também estudaram os betões poliméricos utilizando agregados finos de cinzas volantes.

Gorninski, Dal Molin et al [21] publicaram em 2004 um trabalho em que estudaram o comportamento do módulo de elasticidade de betões poliméricos. Como ligante usaram dois tipos de resina de poliéster: - ortoftálico (12% em peso) e isoftálico (13% em peso) e como

agregado fino usaram cinzas volantes em várias percentagens, (8%, 12%, 16% e 20%) em peso. O valor máximo de módulo de elasticidade obtido foi de 29 GPa. Quanto a resistência à compressão axial, verificou-se um aumento, com o incremento das percentagens em peso de cinzas volantes (Figura 2.21).

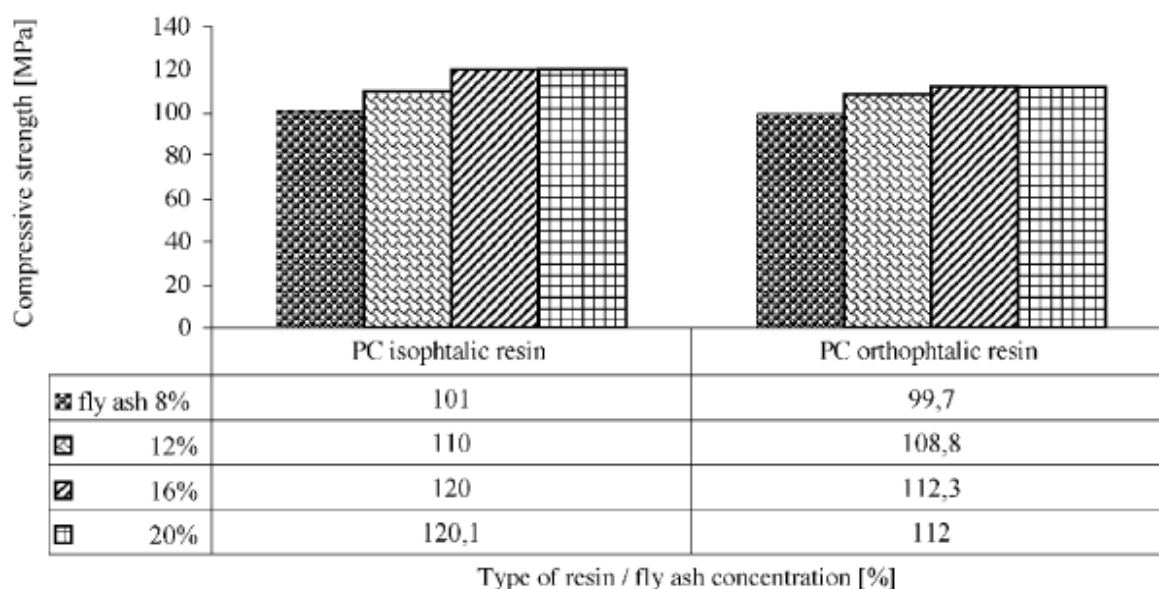


Fig.2.21- Efeito do tipo de resina e cinzas volantes de concentração na resistência à compressão axial [21].

Em 2007, **Gorninski, Dal Molin et al** [20] realizaram um novo estudo em que estudaram a degradação de betões poliméricos em ambientes ácidos. Nesse estudo, consideraram as mesmas composições estudadas anteriormente [21]. As amostras foram expostas a sete ambientes ácidos diferentes (ácido acético, ácido cítrico, ácido fórmico, ácido láctico, ácido sulfúrico, coca-cola, e água destilada) representando os agentes responsáveis por processos corrosivos em ambientes industriais.

Nenhuma das composições mostrou evidências de mudanças físicas e nem perda de massa. Verificou-se uma diminuição na resistência à flexão das amostras expostas a agentes corrosivos, tendo este efeito sido mais pronunciado nas composições com menores concentrações de cinzas volantes. No entanto, mesmo nessas amostras, os valores da resistência à flexão permaneceram superiores aos encontrados nas argamassas preparadas com cimento Portland. Através da análise de microscópio electrónico (SEM) os autores mostraram que o ataque químico ocorreu na interface entre agregado e a matriz polimérica.

Em 1999, **Abdel-Fattah e El-Hawary** [24] estudaram o comportamento à flexão de betão polimérico, ensaiando vigas de betão polimérico à flexão. Concluíram destes ensaios que as vigas de betão polimérico apresentam um comportamento mais dúctil comparadas com as de betão convencional. Em termos de resistência e extensão de rotura as vigas de betão polimérico apresentaram valores bastante superiores comparativamente com as vigas de betão de cimento Portland.

Bignozzi, Saccani et al. [25, 26] desenvolveram um novo tipo de argamassas poliméricas, utilizando como agregados resíduos indústrias, provenientes de pneus usados e cabos eléctricos. No primeiro trabalho realizado, em 2000 [25], estudaram a influência dos resíduos reciclados na formulação das argamassas poliméricas, através de ensaios mecânicos (compressão e flexão) e também sobre o ponto de vista de microestrutura (análise de SEM). Em 2002 [26] estudaram o comportamento dinâmico e dieléctrico do material.

Além dos autores referidos existem muitos outros que fizeram estudos com betões poliméricos utilizando como agregados, resíduos de borracha proveniente de pneus usados, destacando-se os trabalhos realizados pelos investigadores, **Yildirim** [27], **Hwang, Ko et al.** [28], **Rossignolo e Agnesini** [29].

Oyawa, Sugiura et al. [30-32] realizaram vários ensaios à compressão axial e à flexão de argamassas poliméricas confinadas por tubo de aço, tendo verificado nesses ensaios um aumento significativo da resistência e ductilidade nos provetes confinados.

Capítulo 3

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo caracterizam-se os modelos experimentais utilizados, a sua geometria e os parâmetros estudados. Fala-se na preparação e cuidados a ter na execução dos modelos e descreve-se o sistema de ensaio, a instrumentação dos modelos e os procedimentos utilizados.

3.1 - APRESENTAÇÃO DOS MODELOS

Realizaram-se três séries de ensaios. Na primeira série analisou-se o efeito da composição no comportamento mecânico de argamassas poliméricas à base de granulado de cortiça ou de borracha, nas duas últimas séries estudou-se o efeito da escala.

Para a primeira série de ensaios produziram-se noventa e seis provetes prismáticos de dimensão $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$ que foram ensaiados à flexão. Como a rotura neste tipo de ensaio dá-se a meio do provete, é possível aproveitar as duas metades daí resultantes. Deste modo produziram-se posteriormente mais noventa e seis provetes cúbicos de secção $(40 \times 40) \text{ mm}^2$ que foram ensaiados à compressão monotónica. Com a campanha de ensaios realizados pretende-se analisar diversos parâmetros como o tipo de resina, o tipo de agregado e a respectiva composição.

Apresentam-se na Tabela 3.1 a composição dos provetes, a geometria e o tipo de ensaio a que foram submetidos. Para cada composição apresentada na Tabela 3.1 foram executados três provetes. A análise dos resultados obtidos nos ensaios é apresentada no capítulo 5.

Provetes	Composições				Geometria	Tipo de Ensaio	
	Resina	[%]	Agregado	[%]	[mm]	Tracção por flexão	Compressão Monotónica
MC85E	MC	85	Cortiça (1-2)	15	Prismático (40x40x160)	3	3
MC90E		90		10		3	3
MC95E		95		5		3	3
MC85A	MC	85	Cortiça (Pó)	15		3	3
MC90A		90		10		3	3
MC95A		95		5		3	3
IC85E	IC	85	Cortiça (1-2)	15		3	3
IC90E		90		10		3	3
IC95E		95		5		3	3
IC85A	IC	85	Cortiça (Pó)	15		3	3
IC90A		90		10		3	3
IC95A		95		5		3	3
MC85RA	MC	85	Borracha (RA1435)	15		3	3
MC90RA		90		10		3	3
MC95RA		95		5		3	3
MC70DC	MC	70	Borracha (DC8000)	30		3	3
MC75DC		75		25		3	3
MC80DC		80		20		3	3
MC85DC		85		15		3	3
MC90DC		90		10		3	3
MC95DC		95		5		3	3
IC85RA	IC	85	Borracha (RA1435)	15		3	3
IC90RA		90		10		3	3
IC95RA		95		5		3	3
IC70DC	IC	70	Borracha (DC8000)	30		3	3
IC75DC		75		25		3	3
IC80DC		80		20		3	3
IC85DC		85		15		3	3
IC90DC		90		10		3	3
IC95DC		95		5		3	3
MC100	MC	100	-	-		3	3
IC100	IC	100	-	-		3	3
Número de Provetes						96	96

Tabela 3.1- Características dos provetes ensaiados na 1ª série.

A designação apresentada neste estudo para os provetes seguiu o seguinte critério: tipo de resina (MC ou IC) + percentagem de resina em peso (70 a 100%) + tipo de agregado (A, E, RA ou DC), ou seja, os provetes de argamassa polimérica MC85A são constituídos por 85% de resina MC (em peso) e 15% de agregado de cortiça do tipo A (pó). No caso de se tratar de provetes com 70% de resina IC em peso e 30% de agregado de borracha DC a designação será: IC70DC. Na situação dos provetes de referência, constituídos apenas por resina, optou-

se por utilizar a designação MC100 ou IC100. Sempre que esta designação é seguida de um número, este número corresponde ao número do provete em análise.

Para a segunda série de ensaios cujo objectivo era o estudo dos efeitos de escala em provetes de secção circular, produziram-se cento e vinte provetes de várias dimensões e composições que foram ensaiados à compressão monotónica. Apresentam-se na Tabela 3.2 a composição dos provetes, a geometria, o tipo de ensaio a que foram submetidos. A análise dos resultados obtidos nos ensaios é apresentada no capítulo 6.

Composições				Geometria					D [mm]	Tipo de Ensaio
				h [mm]						
Resina	[%]	Agregado	[%]	9.2	23	46	92	184		
				h/D						
				1/5	1/2	1	2	4		
MC	100	-	-	3	3	3	3	3	46	Compressão Monotónica
	85	Cortiça (A)	15	3	3	3	3	3		
	70	Borracha (DC)	30	3	3	3	3	3		
IC	100	-	-	3	3	3	3	3		
	85	Cortiça (A)	15	3	3	3	3	3		
	70	Borracha (DC)	30	3	3	3	3	3		
Número de Provetes				18	18	18	18	18	90	

Tabela 3.2- Características dos modelos ensaiados na 2ª série. Estudo dos efeitos de escala em provetes de secção circular ($D = 46 \text{ mm}$).

Ainda na 2ª serie de ensaios, foram ensaiados à compressão monotónica, mais 30 provetes de secção circular, com as mesmas alturas dos provetes apresentados na Tabela 3.2, e com o dobro¹ do diâmetro. Apresentam-se na Tabela 3.3 a composição desses provetes, a geometria e o tipo de ensaio a que foram submetidos.

Composições				Geometria					D [mm]	Tipo de Ensaio
				h [mm]						
Resina	[%]	Agregado	[%]	9.2	23	46	92	184		
				h/D						
				1/10	1/4	1/2	1	2		
MC	100	-	-	3	3	3	3	3	98	Compressão Monotónica
IC	70	Borracha (DC)	30	3	3	3	3	3		
Número de Provetes				6	6	6	6	6	30	

Tabela 3.3- Características dos modelos ensaiados na 2ª série. Estudo dos efeitos de escala em provetes de secção circular ($D = 98 \text{ mm}$).

¹ 2.13 \approx 2

Para a 3ª série de ensaios cujo objectivo era o estudo dos efeitos de escala em provetes de secção rectangular, produziram-se quarenta e cinco provetes prismáticos de várias dimensões e composições que foram ensaiados à compressão monotónica. Apresentam-se na Tabela 3.3 a composição dos provetes, a geometria, o tipo de ensaio a que foram submetidos.

Composições				Geometria					Base [mm]	Tipo de Ensaio
				h (mm)						
Resina	[%]	Agregado	[%]	8	20	40	80	160		
				h/B						
				1/5	1/2	1	2	4		
MC	100	-	-	3	3	3	3	3	(40x40)	Compressão Monotónica
	85	Cortiça (A)	15	3	3	3	3	3		
	70	Borracha (DC)	30	3	3	3	3	3		
Número de Provetes				9	9	9	9	9	45	

Tabela 3.4- Características dos modelos ensaiados na 3ª série. Estudo dos efeitos de escala em provetes de secção rectangular.

3.2 - PARÂMETROS ANALISADOS

Estudou-se a influência de diversos parâmetros no comportamento mecânico das argamassas poliméricas, tal como o tipo de resina (MC-DUR1390 VK ou ICOSIT KC 220/60), o tipo de agregado (cortiça ou borracha), a geometria dos provetes (variação da altura, do diâmetro e da forma). Apresentam-se em seguida os parâmetros analisados:

i) Tipo de resina

Utilizaram-se dois tipos de resina, MC-DUR1390 VK (MC) e ICOSIT KC 220 (IC), descritas no capítulo 4. Estudou-se a influência da variação do tipo de resina no comportamento mecânico das argamassas poliméricas. Mantiveram-se constantes os restantes parâmetros (o tipo de agregado e a geometria).

ii) Tipo de agregado

Utilizaram-se quatro tipos de agregado, cortiça de granulometria 1-2 mm (E), pó de cortiça (A), borracha RA1435 (RA) e borracha DC8000 (DC) descritas no capítulo 4. Analisou-se a influência da variação do tipo de agregado mantendo-se constantes os restantes parâmetros (tipo de resina e geometria).

iii) Geometria

A influência deste parâmetro foi estudada na 2ª e 3ª série de ensaios, tendo-se variado a altura, o diâmetro e a forma dos provetes. A figura seguinte apresenta a geometria dos provetes utilizados para estudar este parâmetro.

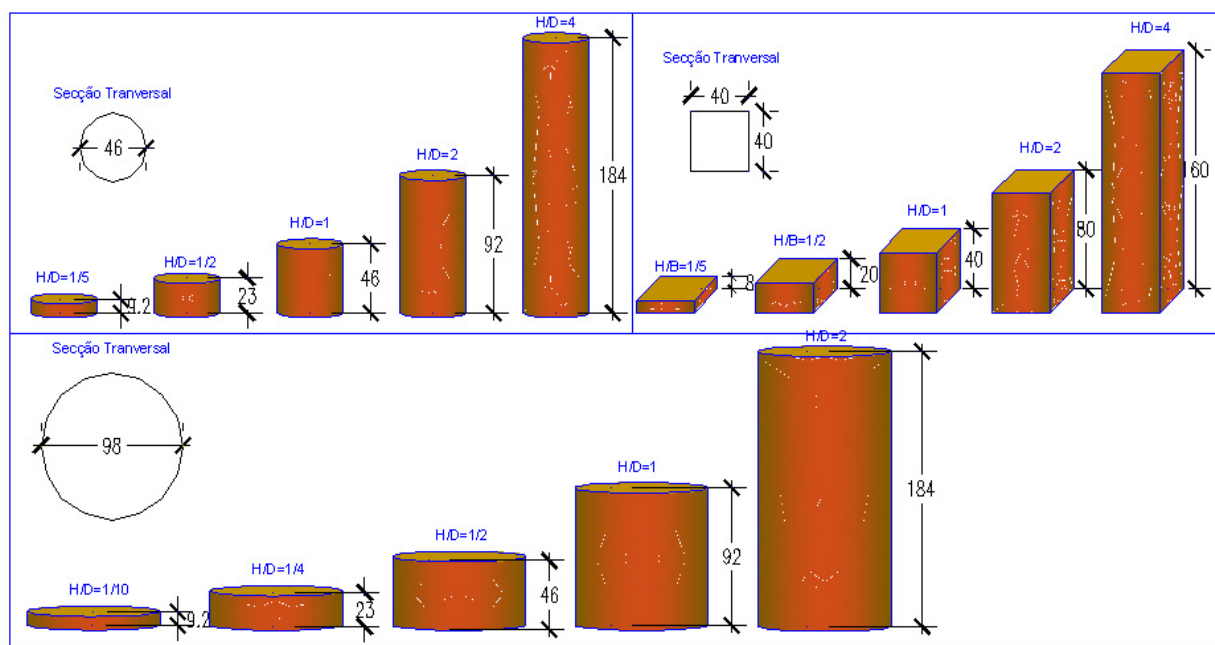


Fig. 3.1- Geometria dos provetes ensaiados na 2ª e 3ª série.

3.3 - PREPARAÇÃO DOS PROVETES

A preparação dos provetes a ensaiar teve um cuidado especial nas diversas fases de execução: preparação dos moldes, preparação da argamassa polimérica e a sua cura, rectificação dos provetes.

3.3.1 - PREPARAÇÃO DOS MOLDES

Na execução dos provetes foram utilizados os moldes apresentados na Figura 3.1. Para execução dos provetes ensaiados na 1ª e 3ª série foram usados os moldes prismáticos metálicos de dimensão 160x40x40 mm³. Para os provetes ensaiados na 2ª série foram usados os moldes cilíndricos metálicos de diâmetro 98 mm e os moldes cilíndricos de PVC de diâmetro 46 mm.

Os moldes foram montados sobre uma superfície regular e não inclinada. Antes de colocar a argamassa nos moldes foi utilizado um produto descofrante especial para materiais poliméricos, de modo a facilitar a descofragem 24 horas após o endurecimento da argamassa.

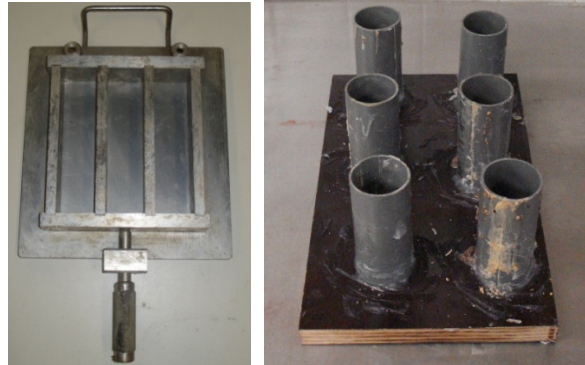


Fig. 3.2- Moldes utilizados na preparação dos modelos

3.3.2 - PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS

Na preparação das argamassas poliméricas deve-se ter especial atenção três aspectos: i) Mistura dos componentes (resina/endurecedor e agregados); ii) precauções de manuseamento; iii) temperatura a que a mistura é feita.

i) Mistura dos componentes

As características mecânicas da argamassa polimérica são influenciadas pelo rigor com que são respeitadas as proporções de resina e endurecedor na mistura, indicadas pelo fabricante. A mistura dos componentes da resina deve ficar perfeitamente homogênea. Normalmente os fabricantes fornecem resina e endurecedor de cores diferentes com o objectivo de facilitar o controlo da homogeneidade da mistura.

Os meios a utilizar para efectuar a mistura dependem fundamentalmente dos volumes em causa e da viscosidade dos componentes. Para quantidades da ordem de 1 litro poderá a mistura realizar-se normalmente por meio de espátulas ou dispositivos manuais. Para maiores volumes deverão usar-se dispositivos mecânicos de mistura (Figura 3.2). A velocidade de rotação não deve exceder 300 rot/mim por forma a não introduzir ar na mistura.



Fig.3.3- Dispositivo mecânico de mistura

Tratando-se de produtos pré-doseados, qualquer que seja o método utilizado para efectuar a mistura deve ter-se a cuidado de raspar bem o fundo e as paredes dos recipientes para garantir a perfeita homogeneidade.

ii) Precauções de manuseamento

A elevada basicidade das resinas epoxy faz com que o contacto com esta se torne muito irritante. Deve portanto ser evitado o seu contacto directo com a pele do qual poderão resultar irritações ou queimaduras e ainda ocorrer reacções alérgicas.

No manuseamento deste tipo de material devem dispor-se de meios de protecção tais como luvas e máscara. É também recomendado, sempre que possível, trabalhar-se em lugares bem ventilados.

iii) Temperatura

A temperatura é um factor muito importante a ter em conta, na preparação das argamassas poliméricas. O aumento da temperatura provoca o aumento velocidade de polimerização, encurtando drasticamente os tempos de utilização (*pot-life*) e o endurecimento. Em geral, entre 15°C e 20°C, a maioria das resinas epoxídicas poderão ser manuseada sem problemas especiais. Os valores da temperatura que está relacionado com *pot-life* depende do tipo de resina epoxídica. Esta informação é fornecida pelo fabricante.

3.3.3 - RECTIFICAÇÃO DOS PROVETES

Nos provetes cilíndricos ensaiados à compressão monotónica foram rectificadas os topos. Com a rectificação dos provetes pretende-se que os topos dos mesmos fiquem paralelos entre si e perpendiculares ao seu eixo, de modo a obter um bom comportamento à compressão.

3.4 - SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1 - EQUIPAMENTOS DE ENSAIO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Todos os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de Estruturas Pesadas do DEC. Os ensaios de flexão foram realizados numa prensa desenvolvida para o efeito (Figura 3.4), controlada através do software proteus por uma bomba hidráulica da marca *Walter+Bay* (Figura 3.3) com a capacidade de pressão de 700 bares. A prensa é composta na parte inferior por um macaco hidráulico (ENERPAC RRH 307) de capacidade de 30 toneladas, e na parte superior, uma célula de carga (TML TCLP-20B) de capacidade de ± 200 kN e que permite medir a carga aplicada (Figura 3.4) e por dois transdutores (TML-CDP100) para medir os deslocamentos.

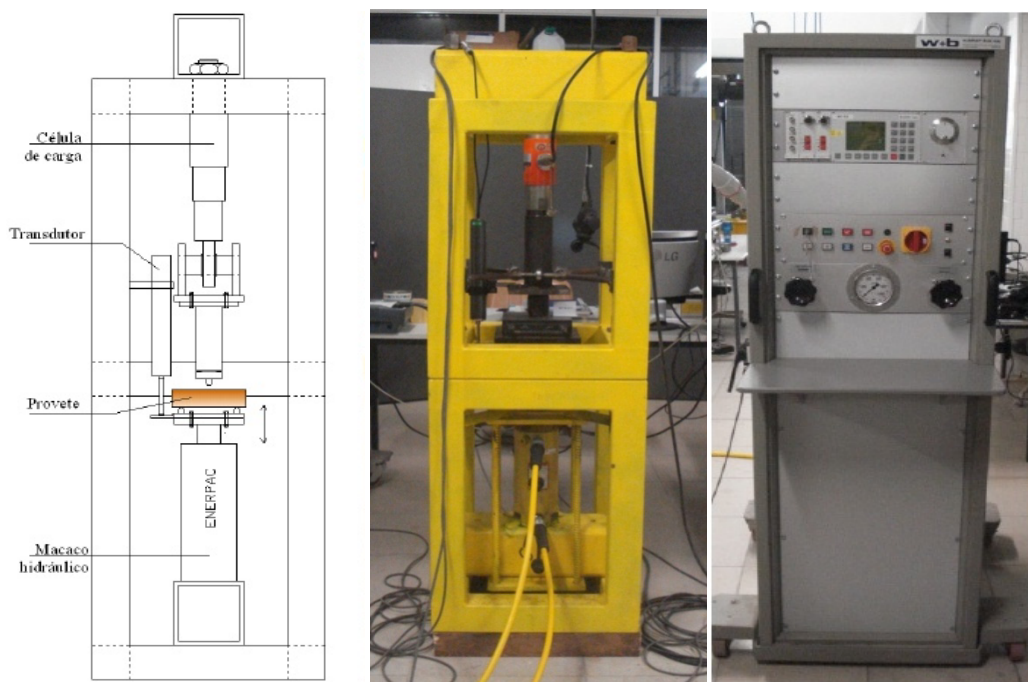


Fig.3.4- Sistemas de ensaios utilizados para a tracção por flexão

Os ensaios à compressão monotónica foram realizados numa prensa servocontrolada (Figura 3.5) da marca *Seidner* modelo 3000D (actualizada pela *walter+bay*) com capacidade de carga até 3000 kN ou de imposição de deslocamentos até 50 mm.

A aquisição de dados foi realizada através de um Datalogger (Spider 8) da HBM com a capacidade para oito canais, para um computador, com o auxílio do software de aquisição de dados, o Catman 4.0 (Figura 3.5).

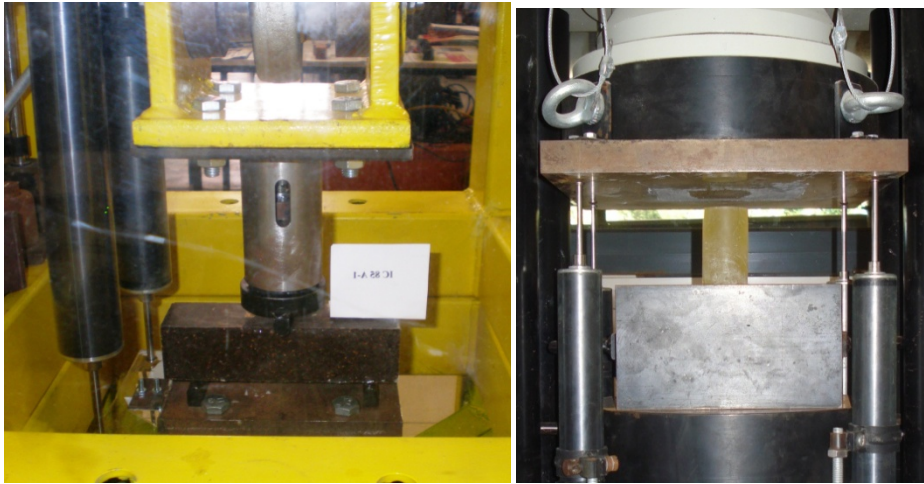


Fig.3.5- Sistemas de ensaios utilizados para a compressão monotónica e sistema de aquisição de dados.

3.4.2 - INSTRUMENTAÇÃO

Nos ensaios de flexão utilizaram-se dois transdutores de deslocamento vertical (TML-CDP100) colocados na parte lateral do modelo (Figura 3.6a) com o objectivo de medir a flecha.

Nos ensaios à compressão monotónica utilizaram-se quatro transdutores de deslocamento vertical (TML-CDP100) colocados em torno do modelo (Figura 3.6b), com o objectivo de medir as deformações durante o ensaio.



a)

b)

*Fig.3.6- Pormenor de colocação de transdutores de deslocamentos:
a) Ensaio de por flexão; b) Ensaio de compressão monotónica.*

3.4.3 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Todos os provetes foram ensaiados à flexão e à compressão a uma velocidade de ensaio de 0,02 mm/s até à rotura à temperatura e humidade relativa da sala de laboratório, tendo sido registados ao longo do ensaio os dados referentes ao deslocamento vertical e à carga aplicada.

Capítulo 4

4 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Apresentam-se neste capítulo os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades dos materiais utilizados na composição das argamassas poliméricas estudadas neste trabalho. Os materiais testados foram as resinas epoxídicas MC- DUR 1390 VK e Icosit KC 220/60, designadas por MC e IC. Foi igualmente realizada a análise granulométrica dos agregados utilizados: pó de cortiça, granulado de cortiça (1-2 mm), pó de borracha (DC8000) e granulado de borracha (RA1435), designados respectivamente por A, E, DC e RA.

4.1 - RESINA EPOXÍDICA

Apresenta-se na Tabela 4.1 uma comparação das propriedades típicas das resinas epoxídicas com as do betão.

Propriedades (20 °C)	Resinas epoxídicas	Betão
Resistência à compressão [MPa]	55-110	25-150
Módulo de elasticidade [GPa]	0,5-20	20-50
Resistência à tracção [MPa]	9-30	1-4
Deformação na rotura por tracção [%]	0,5-5	0,015
Coefficiente de Poisson	0,3-0,4	0,2
Peso específico [kN/m ³]	11-17	25
Temperatura de transição vítrea, Tg [°C]	45-80	-
Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ /°C]	25-100	11-13

Tabela 4.1- Comparação das propriedades das resinas e do betão [33].

Foram utilizados dois tipos de resinas epoxídicas: MC-DUR1390VK fornecida pela empresa MC-Bauchemie e ICOSIT KC 220/60 fornecida pela empresa SIKA. As duas resinas foram fornecidas em dois componentes, de endurecimento a frio, e isentos de solventes (Figura 4.1).



Fig.4.1- Resinas epoxídicas MC- DUR 1390 VK e ICOSIT KC 220/60.

Na Tabela 4.2 apresenta as características das resinas fornecidas pelo fabricante [34, 35].

CARACTERÍSTICAS		MC-DUR 1390 VK	ICOSIT KC220/60
Peso específico [kN/m ³]		10,8	13,6
Pot Life [Min.]		30 (a 20°C)	60 (a 20°C)
Proporções da Mistura [%]	Resina	75	55
	Endurecedor	25	45
Resistência à compressão [MPa]		--	120
Resistência à flexão [MPa]		--	35
Módulo de elasticidade [GPa]		--	4

Tabela 4.2- Características das resinas MC-DUR 1390 VK e ICOSIT KC220/60.

Por forma a caracterizar mecanicamente as resinas epoxídicas MC-DUR 1390VK (MC) e ICOSIT KC 220/60 (IC) fabricaram-se seis provetes prismáticos de dimensão (40x40x160) mm³, três de cada resina.

Disponha-se à partida de seis provetes de resina que foram ensaiados à flexão. Como a rotura neste tipo de ensaio dá-se a meio do provete, é possível aproveitar as duas metades daí resultantes para efectuar os ensaios de compressão. Deste modo realizaram-se posteriormente seis ensaios de compressão monotónica, três para cada resina. Obteve-se para cada um dos provetes a tensão de rotura, a extensão de rotura e o módulo de elasticidade.

i) Ensaio de flexão

Apresentam-se na Figura 4.2 alguns pormenores dos ensaios de flexão das resinas MC e IC e os respectivos modos de rotura. Na Figura 4.3 apresentam os diagramas tensão - deformação dos ensaios e na Tabela 4.3 indicam-se os valores obtidos para cada provete da tensão de rotura à tracção por flexão (f_{pct}), extensão na rotura (ϵ_{pct}) e do módulo de elasticidade (E). Complementarmente apresenta-se para cada uma destas grandezas o seu valor médio.

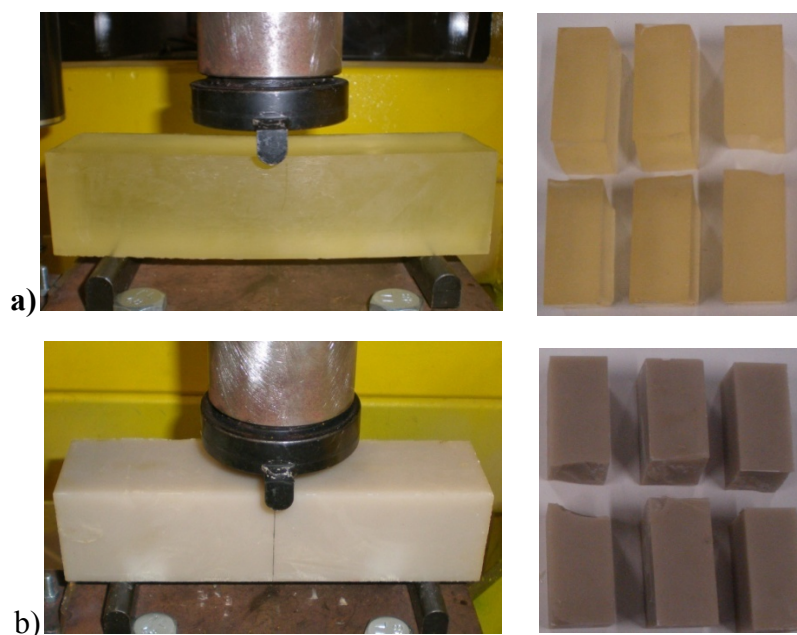


Fig.4.2- Pormenores de ensaio à flexão e os respectivos modos de rotura das resinas.
a) MC; b) IC.

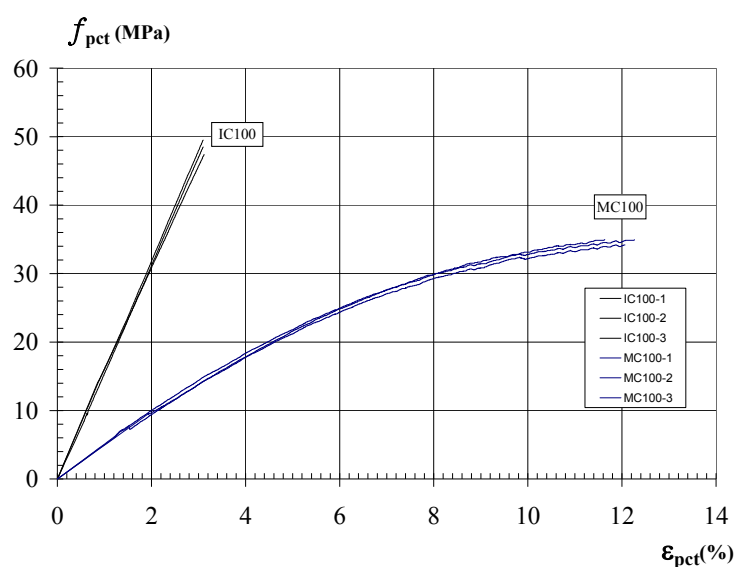


Fig.4.3- Diagrama tensão – deformação do ensaio de flexão das resinas MC e IC.

Provete	$f_{pct,i}$ [MPa]	$f_{pct,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{pct,i}$ [%]	$\varepsilon_{pct,m}$ [%]	E_i [Gpa]	E_m [Gpa]
MC100-1	34.9	34.7	11.64	11.99	0.42	0.44
MC100-2	34.9		12.26		0.45	
MC100-3	34.2		12.06		0.46	
IC100-1	49.1	48.7	3.07	3.09	1.57	1.57
IC100-2	49.5		3.09		1.65	
IC100-3	47.5		3.12		1.5	

Tabela 4.3- Resultados dos dos ensaios de flexão das resinas MC e IC.

Constata-se da análise da Figura 4.3 e da Tabela 4.3 que, em termos de resistência à tracção, os provetes de resina IC apresentam um valor médio de 48,7 MPa, superior aos provetes de resina MC (34,7 MPa). No que diz respeito ao módulo de elasticidade em tracção por flexão também o valor médio apresentado nos provetes de resina IC é superior ao valor médio apresentado nos provetes de resina MC. Contudo, é de realçar o facto da extensão de rotura ser superior nos provetes de resina MC (11,99%) relativamente aos provetes de resina IC (3,09%).

ii) Ensaios de compressão monotónica

Na Figura 4.4 apresentam-se os diagramas tensão - deformação dos ensaios e na Figura 4.5 apresentam-se os modos de rotura. Na Tabela 4.4 indicam-se os valores obtidos em cada provete para a tensão cedência (f_c), extensão de cedência (ε_c), tensão de rotura à compressão (f_r), extensão de rotura (ε_r) e do módulo de elasticidade (E). Indicando-se para cada uma destas grandezas o seu valor médio.

Tal como aconteceu nos ensaios de flexão, os valores de resistência à compressão monotónica são superiores nos provetes de resina IC. Na análise da Figura 4.4 e da Tabela 4.4, podemos constatar que o módulo de elasticidade apresentado nos provetes de resina IC é superior ao valor apresentado nos provetes de resina MC. Em termos de extensão de rotura à compressão os provetes de resina IC apresentam também valores superiores aos provetes de resina MC.

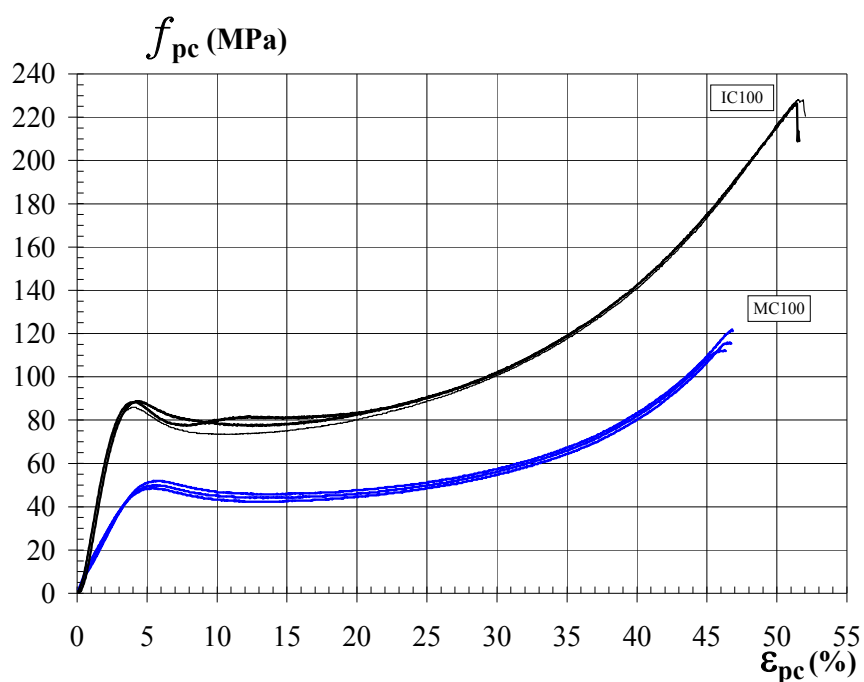


Fig.4.4- Diagrama tensão – deformação - resinas MC e IC.

Provete	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC100-1	87.6	87.3	3.91	3.81	223.9	217.6	51.98	51.86	3.64	3.62
IC100-2	88.2		3.88		209.0		51.59		3.64	
IC100-3	86.2		3.63		220.0		52.02		3.58	
MC100-1	49.1	49.4	4.91	4.92	112.0	116.1	46.35	46.65	1.10	1.11
MC100-2	50.8		4.90		121.1		46.85		1.09	
MC100-3	48.1		4.95		115.4		46.74		1.14	

Tabela 4.4- Resultados dos ensaios à compressão monotônica das resinas MC e IC.

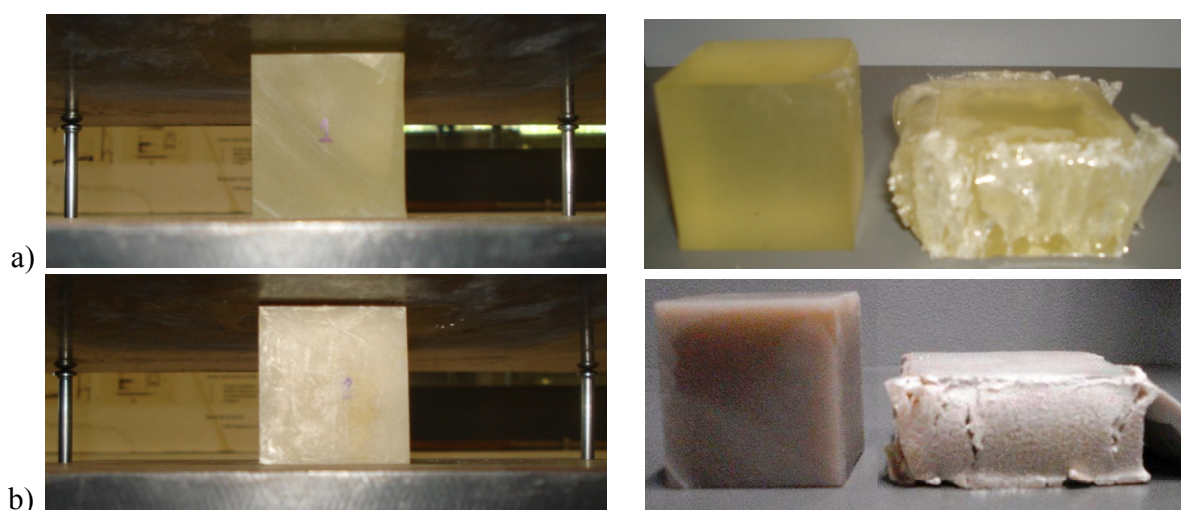


Fig. 4.5- Pormenores de ensaios à compressão, e respectivos modos de rotura: a) Provete de resina MC e b) Provete de resina IC.

Apresenta na Tabela 4.5 as comparações das características fornecidas pelo fabricante com as características ensaiadas.

	Resistencia à compressão				Resistencia à tracção por flexão			
	Valores do Fabricante		Valores ensaiados		Valores do Fabricante		Valores ensaiados	
Provete	$f_{r,m}$ [MPa]	E_m [GPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	E_m [GPa]	f_{pct} [MPa]	E_m [GPa]	f_{pct} [MPa]	E_m [GPa]
IC	120.0	4.0	217.6	3.62	35.0	--	48.4	1.57
MC	--	--	116.1	1.11	--	--	34.1	0.44

Tabela 4.5- Comparação das características fornecidas pelo fabricante com as ensaiadas.

4.2 - CORTIÇA

A cortiça é um material de origem vegetal, obtida da casca dos sobreiros. Tratando-se de um produto 100% natural e ecológico, a cortiça é tida como a matéria-prima com uma posição de vantagem nos parâmetros ecológicos e de sustentabilidade. Portugal transforma cerca de 70% da produção mundial, mais de 60% dos quais para a produção de rolhas de cortiça natural [36].

4.2.1 - ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CORTIÇA

Na Figura 4.6 apresenta-se um corte transversal de um tronco de sobreiro, onde se podem identificar cinco zonas distintas.

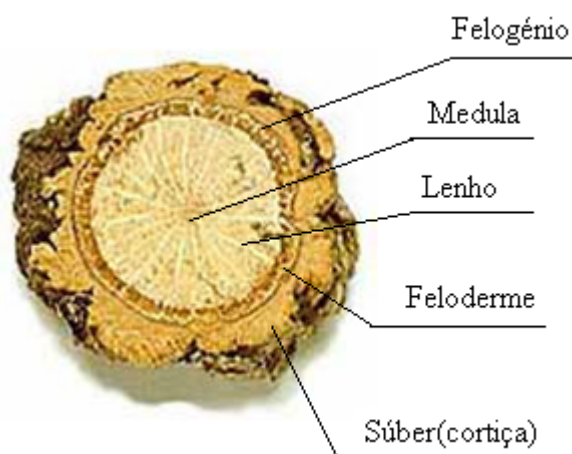


Fig.4.6- Corte transversal de um sobreiro [37].

Os principais constituintes químicos da cortiça são [36, 38]:

- ✓ Suberina (45%) - principal componente das paredes das células, responsável pela elasticidade da Cortiça;
- ✓ Lenhina (27%) - composto isolante;
- ✓ Celulose e Polissacáridos (12%) - componentes das paredes das células que ajudam a definir a textura da cortiça;
- ✓ Taninos (6%) - compostos polifenólicos responsáveis pela cor;
- ✓ Ceróides (5%) - compostos hidrofóbicos que asseguram a impermeabilidade da cortiça;
- ✓ Cinza e outros produtos (5%).

4.2.2 - PROPRIEDADES DA CORTIÇA

A cortiça é um material com características muito positivas, destacando-se de entre elas as seguintes:

- ✓ Leveza;
- ✓ Grande capacidade de absorção de energia (em impacto);
- ✓ Grande capacidade de dissipação de energia (em vibrações);
- ✓ Elevado coeficiente de atrito;
- ✓ Baixa condutividade térmica;
- ✓ Boa resistência ao fogo;
- ✓ Grande poder isolante;
- ✓ Reciclável e biodegradável
- ✓ Isolador acústico perfeito
- ✓ Resistente ao desgaste

É de destacar que a leveza é uma das principais qualidades da cortiça. A sua excelente capacidade de compressibilidade, aliada à flexibilidade e à elasticidade das suas membranas, permite a rápida recuperação da sua forma inicial após a compressão.

Apresenta-se na Tabela 4.6 o comportamento da cortiça [36].

Características	Valor médio
Massa volúmica	180Kg.m ⁻³
Módulo de Young (compressão)	13 MPa
Módulo de Young (tracção)	18 MPa
Coeficiente de Poisson	0,18
Coeficiente de precipitação de energia	0,2
Coeficiente de atrito	0,3
Calor específico (Pcte)	35J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Coeficiente de difusão de água (20°C)	4x10 ⁻¹⁰ m ² .s ⁻³
Difusividade térmica	10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹
Condutividade térmica	0,045W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Tensão de ruptura (tracção)	19MPa

Tabela 4.6- Características físicas e mecânicas da cortiça. Adaptado do Dossier Info Cortiça [36]

4.2.3 - GRANULADO DE CORTIÇA

Os granulados são obtidos a partir da trituração de cortiça virgem, pedaços, refugo, desperdícios de outras operações de processamento, rolhas defeituosas, restos de aglomerados, etc. É também efectuada uma secagem por circulação forçada de ar quente, usualmente em secadores rotativos, para conferir ao granulado o grau de humidade desejado.

São considerados granulados, os fragmentos de cortiça de granulometria superior a 0,25 mm e inferior a 22,4 mm. As partículas inferiores a 0,25 mm são consideradas pó de cortiça [39].

Os granulados de cortiça podem ser utilizados como produto final com a função de isolamento térmico, no enchimento de espaços vazios entre paredes duplas. Estes materiais são utilizados na preparação de argamassas ou betões aligeirados e também na preparação de argamassas ou betões poliméricos.

Para a realização deste trabalho foram utilizados granulado de cortiça de granulometria de 1-2 mm e pó de cortiça, fornecidas pela empresa FABRICOR. Apresenta-se nas Figuras 4.7 e 4.8 as granulometrias utilizadas.

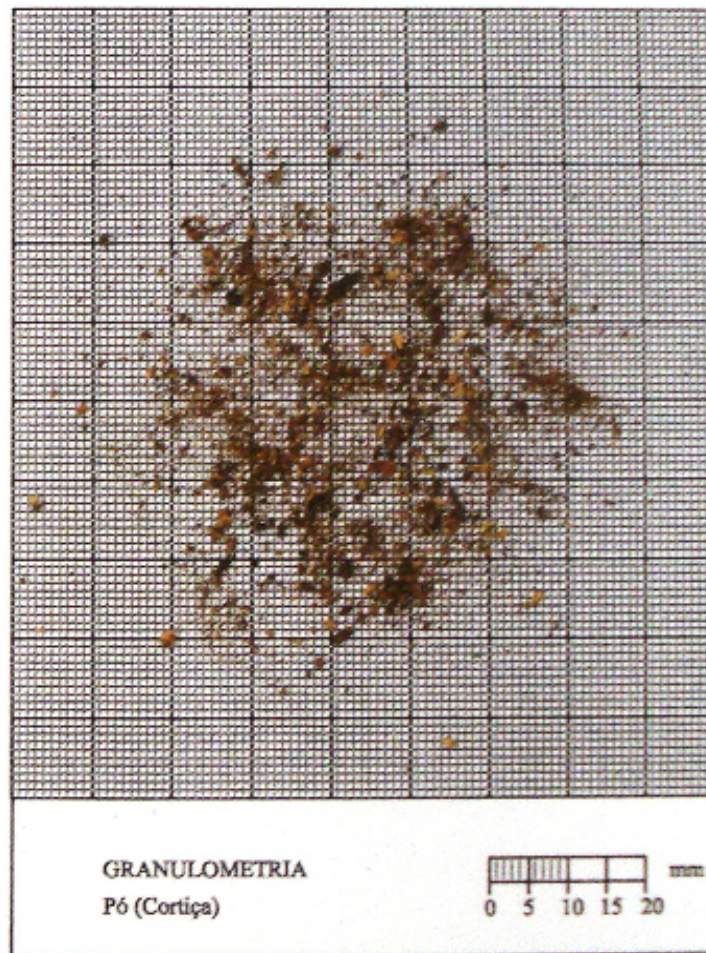


Fig.4.7- Granulometria de cortiça (Pó)



Fig.4.8- Granulometria de cortiça (1-2 mm)

Das várias composições granulométricas existentes em termos comerciais, optou-se por utilizar este dois tipos de granulometrias (pó e 1-2 mm), uma vez que estes tipos de cortiça apresentam uma granulometria extensa, o que proporciona uma melhor distribuição dos grãos quando misturados, possibilitando assim obter melhores características de resistência mecânica.

i) Análise granulométrica

Estudou-se a distribuição percentual dos granulados de cortiça, recorrendo a norma NP EN 933-1 2000- Parte 1 [40]. Analisaram-se 200 gramas para cada tipo de cortiça. Nas Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam-se os resultados da análise granulométrica dos granulados de cortiça e na Figura 4.9 apresentam-se as curvas granulométricas dos granulados de cortiça.

Peneiros	Malha (mm)	Massa Retida (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Total que Passa	% Total Retido
Nº 4	4,76	0	0	0	100	0
Nº 8	2,38	2,01	1,005	1,005	98,995	1,005
Nº 16	1,19	148,91	74,455	75,46	24,54	75,46
Nº 30	0,595	31,34	15,67	91,13	8,87	91,13
Nº 50	0,297	17,56	8,78	99,91	0,09	99,91
Nº 100	0,149	0,18	0,09	100	0	100
Nº 200	0,075	0	0	100	0	100
REFUGO	-	0	0	100	0	100
Módulo de Finura						3,68

Tabela 4.7- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro para o agregado de cortiça 1-2 mm.

Peneiros	Malha (mm)	Massa Retida (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Total que Passa	% Total Retido
Nº 4	4,76	0	0	0	100	0
Nº 8	2,38	0	0	0	100	0
Nº 16	1,19	28,15	14,075	14,075	85,925	14,075
Nº 30	0,595	56,8	28,4	42,475	57,525	42,475
Nº 50	0,297	49,79	24,895	67,37	32,63	67,37
Nº 100	0,149	32,41	16,205	83,575	16,425	83,575
Nº 200	0,075	17,49	8,745	92,32	7,68	92,32
REFUGO	-	15,36	7,68	100	0	100
Módulo de Finura						2,07

Tabela 4.8- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro para o pó de cortiça.

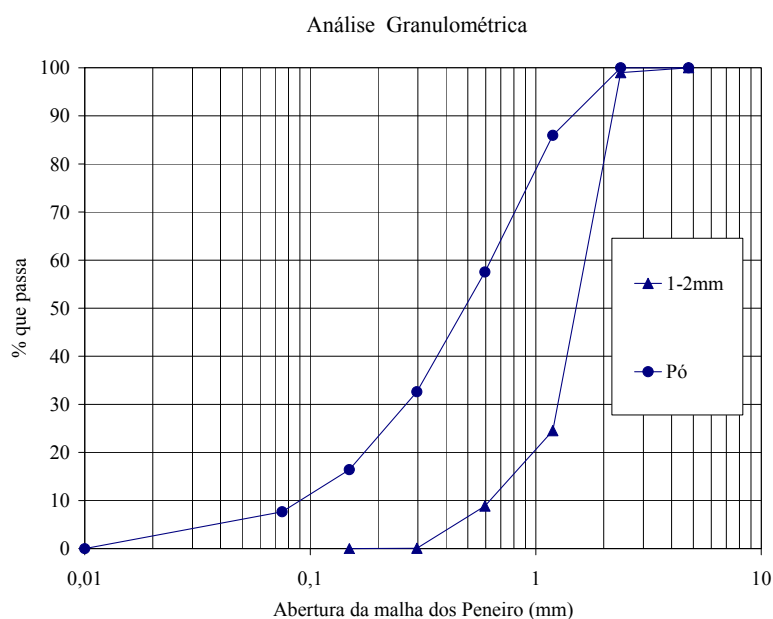


Fig.4.9- Curvas granulométricas dos agregados de cortiça: 1-2 mm e pó

Na peneiração utilizou-se uma coluna de peneiros normalizados de malha quadrada com dimensões compreendidas entre 0,075 a 4,76 mm [41]. A peneiração foi realizada num equipamento de agitação mecânica (Figura 4.10). Após a agitação foram pesadas e registadas as massas dos materiais retidos nos vários peneiros, tendo-se obtido as curvas granulométricas e analisados os parâmetros (Tabela 4.9): Módulo de finura, máxima dimensão (D), mínima dimensão (d) e a percentagem de fino.



Fig.4.10-Equipamento de peneiração mecânica

Cortiça	d (mm)	D (mm)	Módulo de finura	Finos (%)
1-2 (E)	0.595	2.38	3.68	0
Pó (A)	0.075	1.19 ²	2.07	7.68

Tabela 4.9- Parâmetros caracterizados na análise granulométrica.

O *módulo de finura* indica a dimensão média ponderada do grupo na qual é retido a maior quantidade do material. Quanto maior o módulo de finura mais grosso será o agregado. A *máxima dimensão* (D), corresponde à menor abertura da malha do peneiro por onde passa uma quantidade de agregado igual ou superior a 90%, enquanto a *mínima dimensão* (d) – representa a abertura da malha do peneiro por onde passa uma quantidade de agregado igual ou inferior a 5%. A *percentagem de finos* é dada pela percentagem do material que passa no peneiro de 0,075 mm.

² A máxima dimensão (D=1.19 mm é superior a 0,25 mm. Segundo a norma NP 114: 1996 (Ed.3), não se designaria pó, todavia optou-se por continuar a chamar pó, visto que era a designação do fornecedor (Fabricor).

4.3 - BORRACHA

A borracha faz parte da classe de materiais da categoria do elastómero. A mais conhecida é a borracha branca utilizada para actividades simples como apagar textos em lápis. Outra bastante conhecida é a borracha preta, utilizada em pneus e para fins industriais. Este tipo de borracha é bem mais resistente ao impacto, desgaste, e corrosão. Neste trabalho foram utilizados pó de borracha (DC8000) e granulado de borracha (RA1435), produzido da reciclagem de pneus. Estes materiais foram fornecidos pela empresa RECIPNEU.

4.3.1 - PROCESSO DE TRATAMENTO DOS GRANULADOS DE BORRACHA EFECTUADOS PELA RECIPNEU

A matéria-prima utilizada nos granulados de borracha é proveniente de pneus usados, os quais são armazenados na área envolvente da fábrica. A RECIPNEU apenas recebe pneus no seu estado normal de limpeza, sem detritos e contaminações visíveis. Os pneus quando recepcionados são separados por lotes, e é extraído previamente o aro aos pneus de camião. Em seguida é feita o *product-mix* (relação entre o N° de pneus ligeiros por pneus pesados), definido para assegurar as propriedades físico-químicas do granulado borracha requeridas pelas suas futuras aplicações.

Após o corte dos pneus numa fragmentadora, estes são reduzidos a pedaços com tamanho adequado, que entram no sistema criogénico primário, sendo a partir daqui um processo contínuo.



Fig.4.11- Fragmentação e extracção de aros.

São realizadas duas operações principais, criteriosamente controladas no processo:

- ✓ Arrefecimento criogénico dos fragmentos de pneu, usando nitrogénio líquido, para atingir e ultrapassar a temperatura de transição vítrea de todos os polímeros constituintes da borracha. Essa operação é feita no túnel criogénico apresentado na Figura 4.12.
- ✓ Moagem criogénica – usando moinhos de martelos especiais com muito alta energia de impacto, sob uma atmosfera inerte (Figura 4.13).



Fig.4.12- Túnel criogénico



Fig.4.13- Moinhos de martelos

No restante processo existem as seguintes operações: separação densimétrica dos têxteis; separação magnética do aço; secagem da borracha; classificação granulométrica da borracha em dimensões *standard*, separação de poeiras; armazenamento em silos; e ensacagem. Apresenta-se na Figura 4.14 o aspecto do produto final.

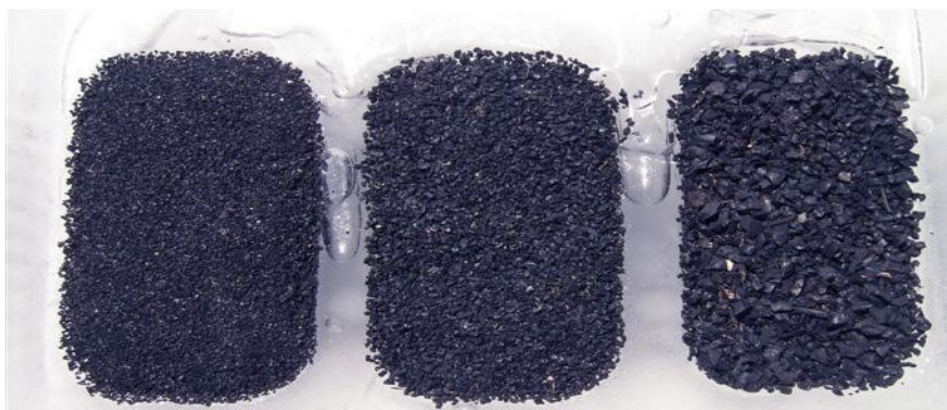


Fig.4.14- Aspecto do produto final mais fino ($< 0,6\text{ mm}$) e mais grosso (cerca de 4 mm).

Apresenta-se na Tabela 4.10 as características das borrachas fornecidas pelo fabricante [42, 43]

Características	DC 8000 (Pó de borracha)	RA1435 (Granulado de borracha)
Descrição química	Borracha de pneu vulcanizada	
Densidade a granel	$0,38 \pm 0,03$ (kg/dm ³)	$0,45 \pm 0,03$ (kg/dm ³)
Forma física	Partículas tipo cubóide	Irregular
Tamanho nominal	<0,25 mm	0,5 - 2 mm

Tabela 4.10- Características das borrachas (DC8000 e RA1435) [42, 43]

i) Análise granulométrica

Analísaram-se 200 gramas dos dois tipos de borrachas (Figuras 4.15 e 4.16). Nas Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam-se os resultados da análise granulométrica dos granulados de cortiça, e na Figura 4.17 apresentam-se as curvas granulométricas dos granulados de borracha utilizados.

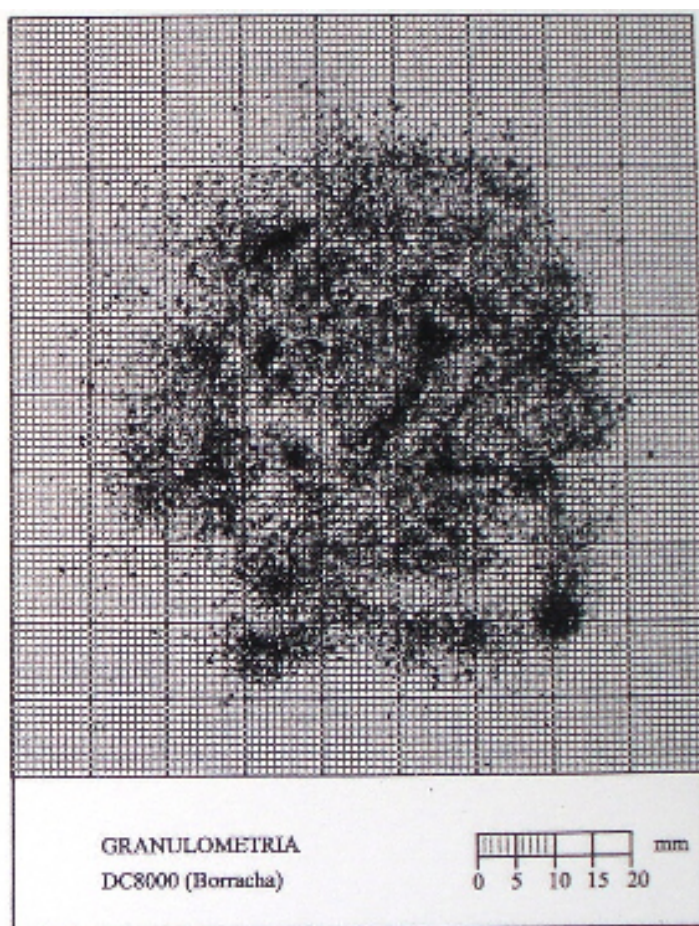


Fig.4.15-Granulometria de borracha (DC8000)

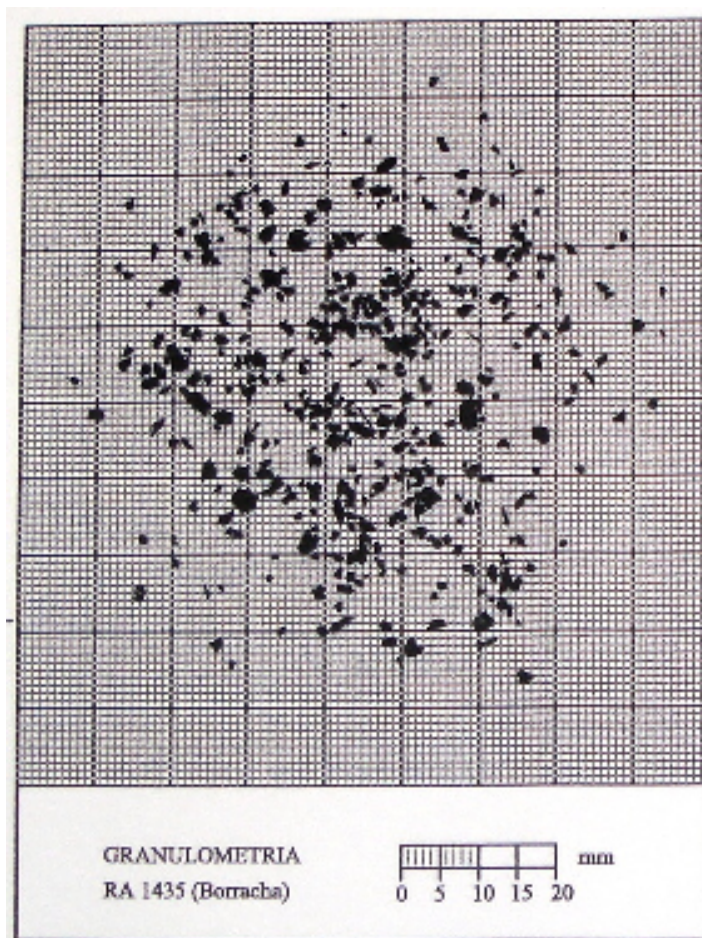


Fig.4.16- Granulometria de borracha (RA1435)

Peneiros	Malha (mm)	Massa Retida (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Total que Passa	% Total Retido
Nº 4	4,76	0	0	0	100	0
Nº 8	2	2,12	1,06	1,06	98,94	1,06
Nº 16	0,85	113,47	56,735	57,795	42,205	57,795
Nº 30	0,25	72,96	36,48	94,275	5,725	94,275
Nº 50	0,149	11,45	5,725	100	0	100
Nº 100	0,106	0	0	100	0	100
Nº 200	0,075	0	0	100	0	100
REFUGO		0	0	100	0	100
Módulo de Finura						3,53

Tabela 4.11-Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Granulado de borracha - RA1435).

Peneiros	Malha (mm)	Massa Retida (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Total que Passa	% Total Retido
Nº 4	4.76	0	0	0	100	0
Nº 10	2.38	0	0	0	100	0
Nº 20	1.19	0	0	0	100	0
Nº 60	0.595	0	0	0	100	0
Nº 100	0.297	45.14	22.57	22.57	77.43	22.57
Nº 140	0.149	112.95	56.475	79.045	20.955	79.045
Nº 200	0.075	38.23	19.115	98.16	1.84	98.16
REFUGO	0.01	3.68	1.84	100	0	100
Módulo de Finura						1.0162

Tabela 4.12- Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Pó de borracha-DC8000).

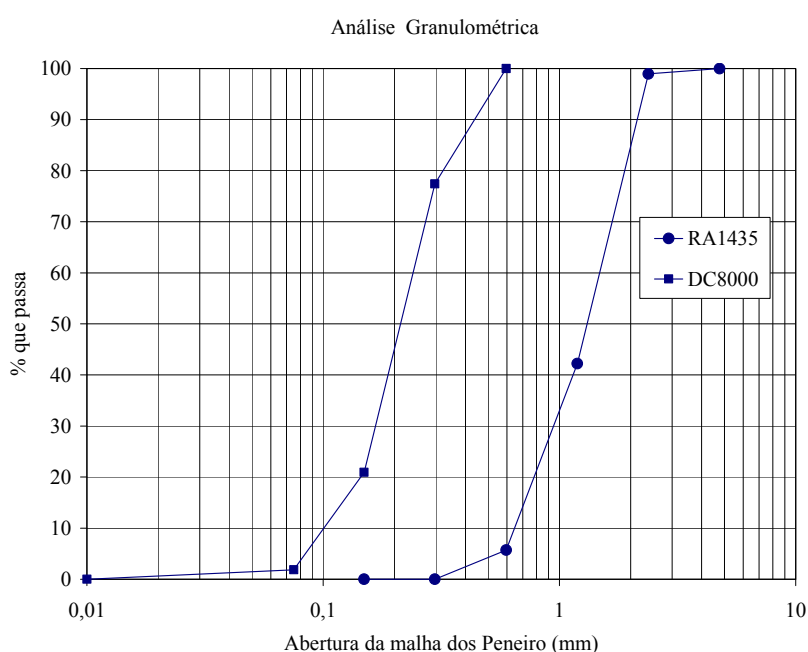


Fig.4.17- Curvas granulométricas dos granulados de borrachas: RA 1435 e DC 8000

Na análise granulométrica analisaram-se quatro parâmetros (Tabela 4.13): Módulo de finura, máxima dimensão (D), mínima dimensão (d) e a percentagem de fino.

Borracha	d (mm)	D (mm)	Módulo de finura	Fino (%)
DC 8000	0,149	0,595	1,0162	1,84
RA 1435	0,25	2	3,53	0

Tabela 4.13- Parâmetros caracterizados na análise granulométrica.

Capítulo 5

5 - EFEITO DA COMPOSIÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS

Apresentam-se, em seguida os resultados obtidos com ensaios experimentais de flexão e à compressão monotónica nos provetes de argamassas poliméricas à base de cortiça e borracha, cujo composições e geometria, foram apresentadas na Tabela 3.1 do capítulo 3.

Optou-se por expôr primeiro os resultados dos ensaios de flexão e no fim os resultados dos ensaios à compressão monotónica. Por forma a tornar mais sintética a apresentação, optou-se por incluir num mesmo diagrama todos os ensaios realizados com o mesmo tipo de material (resina-agregado), variando as suas percentagens. No início apresenta-se cada grupo de ensaios de forma separada e posteriormente faz-se uma análise dos resultados tendo em atenção o efeito dos parâmetros variados: tipo de resina, de agregado e respectivas percentagens da mistura.

5.1 - ENSAIOS DE FLEXÃO

A tensão de tracção por flexão (f_{pct}) e a extensão (ε_{pct}) foram obtidas através das seguintes expressões (5.1):

$$\blacksquare \quad f_{pct} = \frac{3}{2} \frac{F \times L}{b \times h^2}, \quad \varepsilon_{pct} = 6 \frac{\delta \times h}{L^2} \quad (5.1)$$

Em que F é a força aplicada (N), h e b são as dimensões da secção do provete (40 mm), L é a distância entre os apoios (120 mm) e δ é o deslocamento a meio vão do provete.

Nas figuras seguintes, mostra-se para cada tipo de argamassa polimérica e para cada provete a evolução das extensões nos provetes com as tensões a que os mesmos foram sujeitos. A seguir aos diagramas são apresentadas Tabelas com os valores da tensão de rotura à tracção, extensão de rotura e o módulo de elasticidade de cada provete, indicando-se igualmente os respectivos valores médios.

Convém salientar que os níveis de tensão considerados na determinação do módulo de elasticidade são de ordem de 40% a 50%, no troço linear (CD), conforme a norma ASTM.

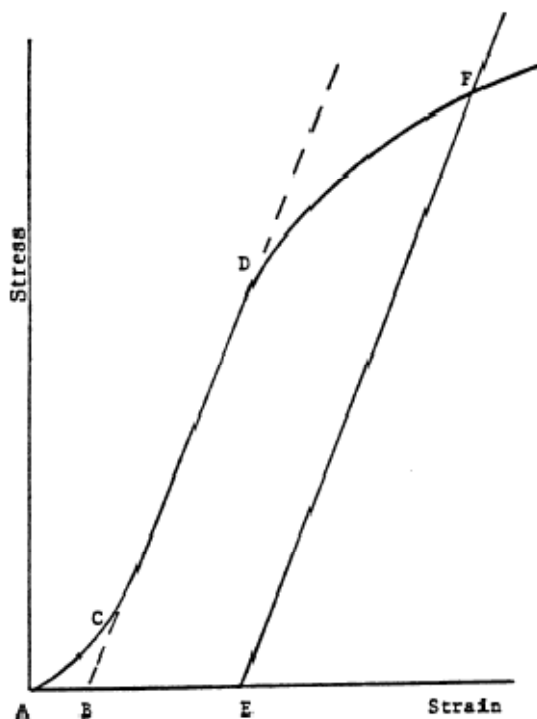


Fig.5.1- Diagrama tensão-deformação específico para materias plásticos [10]

5.1.1 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA MC E CORTIÇA

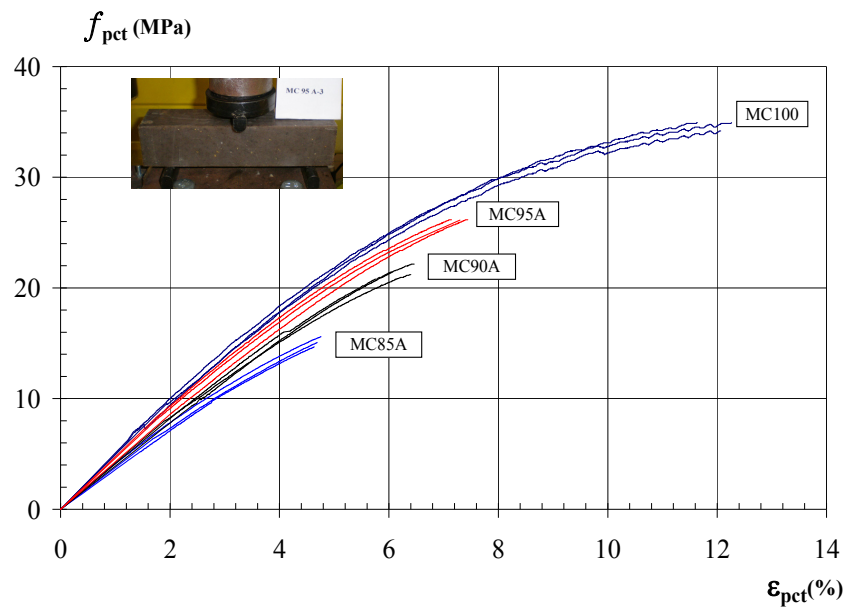


Fig.5.2- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-A.

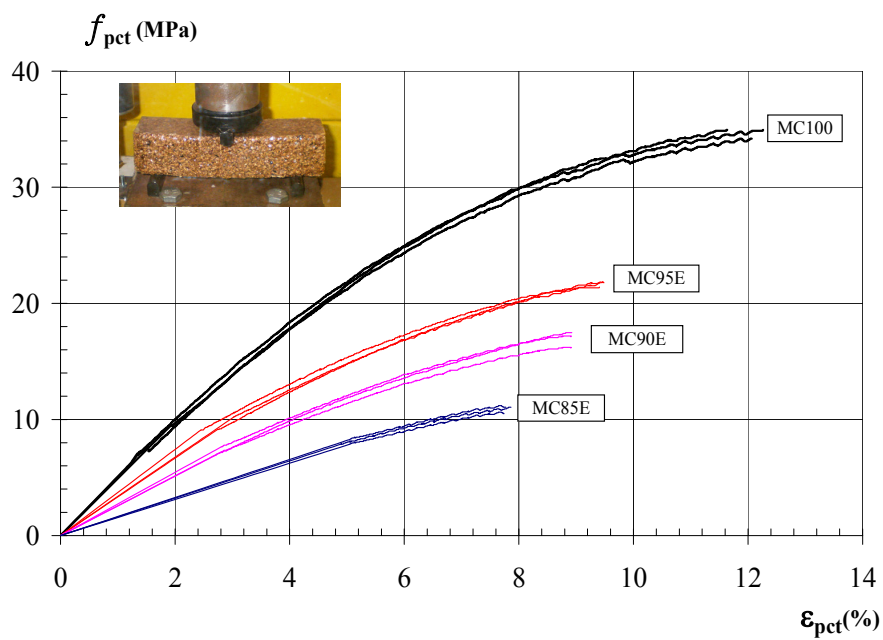


Fig.5.3- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-E.

Provete	$f_{\text{pet},i}$ [MPa]	$f_{\text{pet},m}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{pet},i}$ [%]	$\epsilon_{\text{pet},m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100-1	34.9	34.7	11.64	11.99	0.42	0.44
MC100-2	34.9		12.26		0.45	
MC100-3	34.2		12.06		0.46	
MC95A-1	26.1	26.2	7.30	7.29	0.41	0.40
MC95A-2	26.2		7.14		0.41	
MC95A-3	26.2		7.44		0.39	
MC90A-1	22.2	21.8	6.46	6.44	0.36	0.35
MC90A-2	22.1		6.46		0.37	
MC90A-3	21.1		6.40		0.33	
MC85A-1	14.7	15.1	4.63	4.69	0.35	0.33
MC85A-2	15.1		4.69		0.32	
MC85A-3	15.6		4.76		0.33	
MC95E-1	21.8	21.5	9.54	9.19	0.24	0.25
MC95E-2	21.6		9.18		0.26	
MC95E-3	21.2		8.86		0.25	
MC90E-1	17.2	17.0	8.92	8.91	0.20	0.17
MC90E-2	16.2		8.90		0.19	
MC90E-3	17.5		8.92		0.13	
MC85E-1	10.6	11.0	7.74	7.79	0.16	0.16
MC85E-2	11.2		7.77		0.16	
MC85E-3	11.1		7.86		0.16	

Tabela 5.1- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas de resina MC com agregados de cortiça (A e E).

5.1.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA IC E CORTIÇA

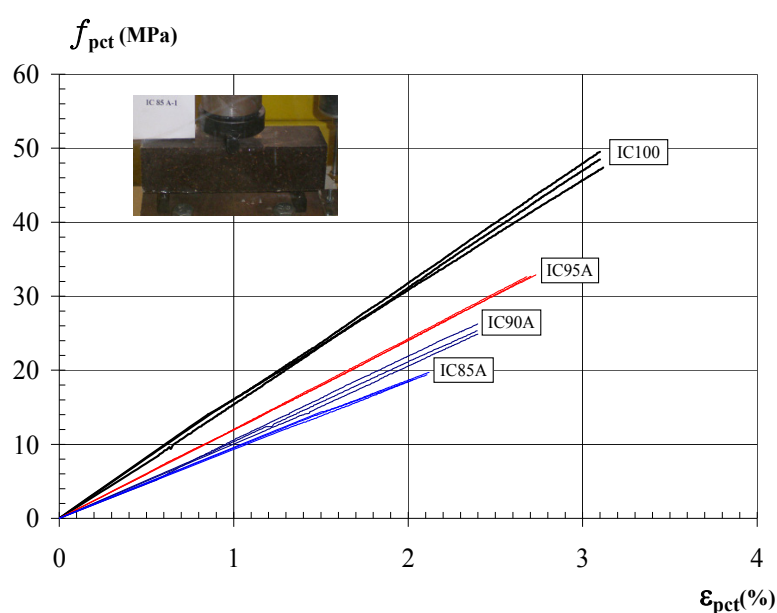


Fig.5.4- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-A.

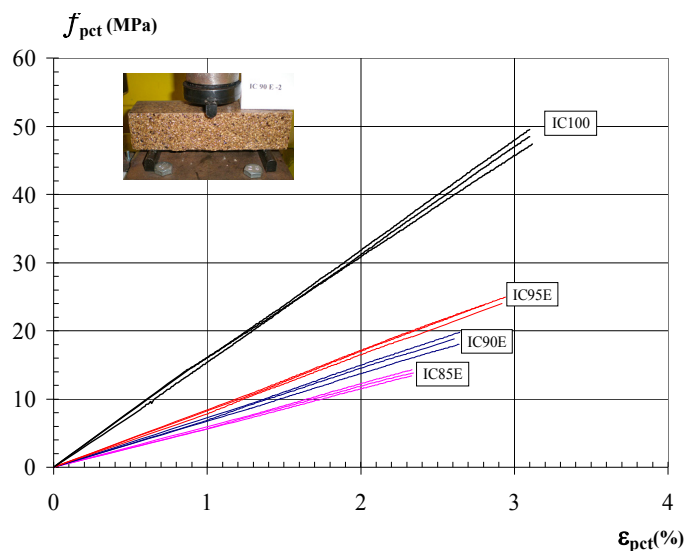


Fig.5.5- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-E.

Proвете	$f_{pct,i}$ [MPa]	$f_{pct,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{pct,i}$ [%]	$\varepsilon_{pct,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC100-1	49.1	48.7	3.07	3.09	1.57	1.57
IC100-2	49.5		3.09		1.65	
IC100-3	47.5		3.12		1.50	
IC95A-1	32.6	32.7	2.68	2.70	1.23	1.22
IC95A-2	32.7		2.70		1.24	
IC95A-3	32.9		2.73		1.18	
IC90A-1	26.3	25.5	2.40	2.40	1.15	1.08
IC90A-2	25.3		2.40		1.06	
IC90A-3	24.9		2.40		1.03	
IC85A-1	19.7	19.3	2.12	2.09	0.92	0.88
IC85A-2	19.4		2.11		0.89	
IC85A-3	18.7		2.03		0.83	
IC95E-1	24.0	24.2	2.92	2.88	0.88	0.88
IC95E-2	24.9		2.93		0.90	
IC95E-3	23.8		2.80		0.87	
IC90E-1	18.8	18.9	2.61	2.63	0.79	0.76
IC90E-2	19.8		2.65		0.79	
IC90E-3	18.0		2.64		0.71	
IC85E-1	13.8	13.8	2.34	2.33	0.65	0.63
IC85E-2	14.3		2.33		0.65	
IC85E-3	13.4		2.33		0.60	

Tabela 5.2- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas IC com agregados de cortiça (A e E).

Na Figura 5.6 apresentam-se alguns pormenores dos diversos tipos de provetes ensaiados à flexão bem como os respectivos modos de rotura, sendo possível de distinguir visualmente as diferentes resinas e composições com agregados de cortiça ensaiadas.

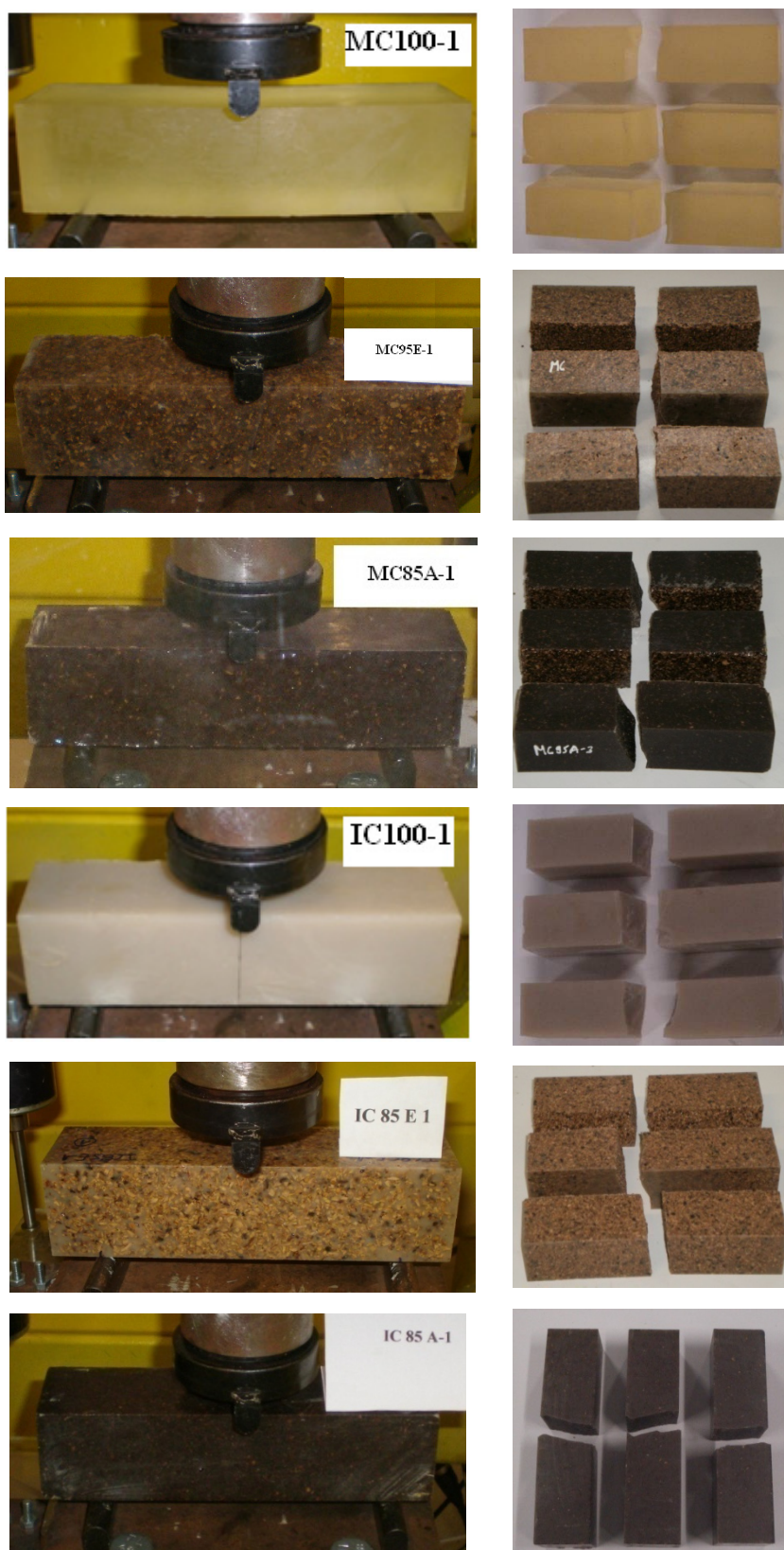


Fig.5.6- Pormenores de ensaios de flexão de provetes de argamassas poliméricas com agregados de cortiça e respectivos modos de rotura.

5.1.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA MC E BORRACHA

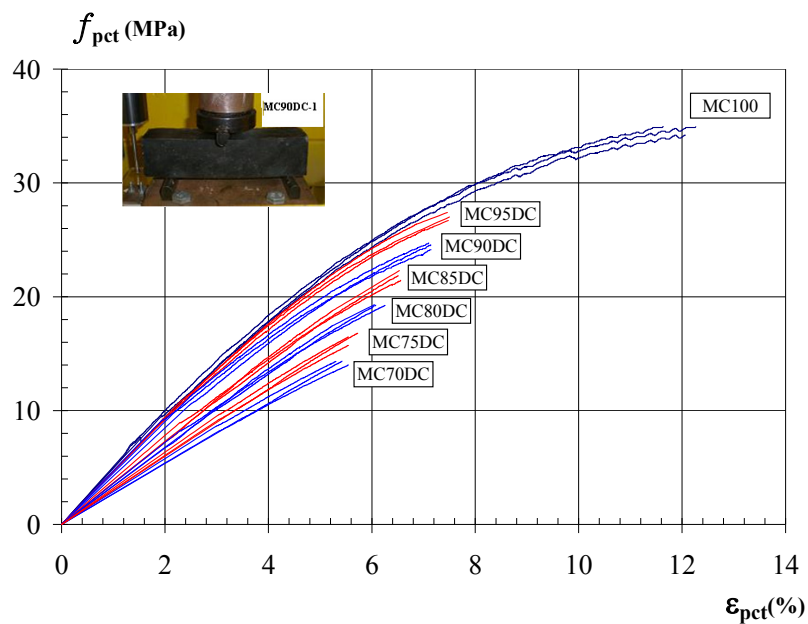


Fig.5.7- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-DC.

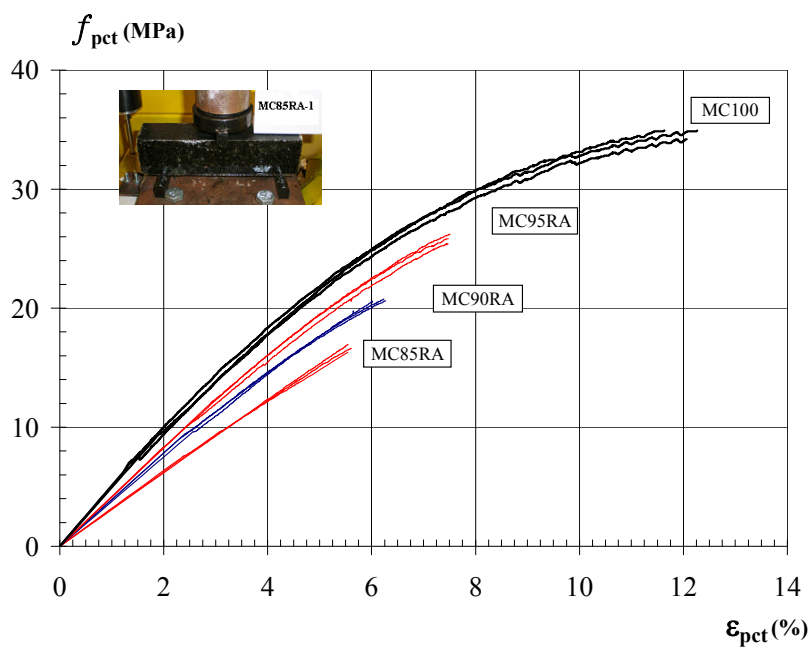


Fig.5.8- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-RA.

Provete	$f_{pct,i}$ [MPa]	$f_{pct,m}$ [MPa]	$\epsilon_{pct,i}$ [%]	$\epsilon_{pct,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100-1	34.9	34.7	11.64	11.99	0.42	0.44
MC100-2	34.9		12.26		0.45	
MC100-3	34.2		12.06		0.46	
MC95DC-1	27.4	27.0	7.46	7.48	0.43	0.40
MC95DC-2	26.7		7.48		0.38	
MC95DC-3	27.0		7.50		0.40	
MC90DC-1	24.6	24.5	7.14	7.13	0.36	0.36
MC90DC-2	24.7		7.10		0.37	
MC90DC-3	24.1		7.14		0.35	
MC85DC-1	22.3	21.9	6.53	6.53	0.38	0.35
MC85DC-2	21.8		6.51		0.34	
MC85DC-3	21.4		6.56		0.33	
MC80DC-1	19.3	19.3	6.05	6.13	0.35	0.32
MC80DC-2	19.3		6.08		0.31	
MC80DC-3	19.2		6.26		0.30	
MC75DC-1	16.8	16.3	5.73	5.61	0.29	0.28
MC75DC-2	16.5		5.55		0.28	
MC75DC-3	15.7		5.55		0.27	
MC70DC-1	14.3	14.2	5.42	5.43	0.26	0.25
MC70DC-2	14.3		5.31		0.25	
MC70DC-3	14.0		5.55		0.24	
MC95RA-1	25.4	25.41	7.47	7.47	0.39	0.37
MC95RA-2	25.4		7.47		0.37	
MC95RA-3	25.4		7.47		0.35	
MC90RA-1	22.3	21.73	6.24	6.17	0.33	0.33
MC90RA-2	20.6		6.02		0.33	
MC90RA-3	22.3		6.26		0.32	
MC85RA-1	16.9	16.86	5.55	5.67	0.31	0.29
MC85RA-2	17.3		5.91		0.29	
MC85RA-3	16.3		5.54		0.29	

Tabela 5.3- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas MC com agregados de borracha (DC e RA).

5.1.4 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA IC E BORRACHA

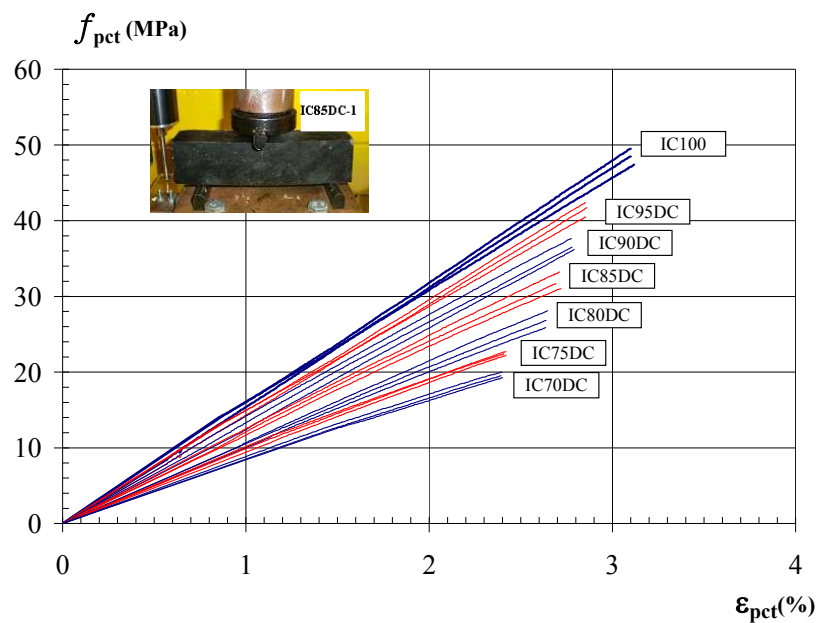


Fig.5.9- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, IC-DC.

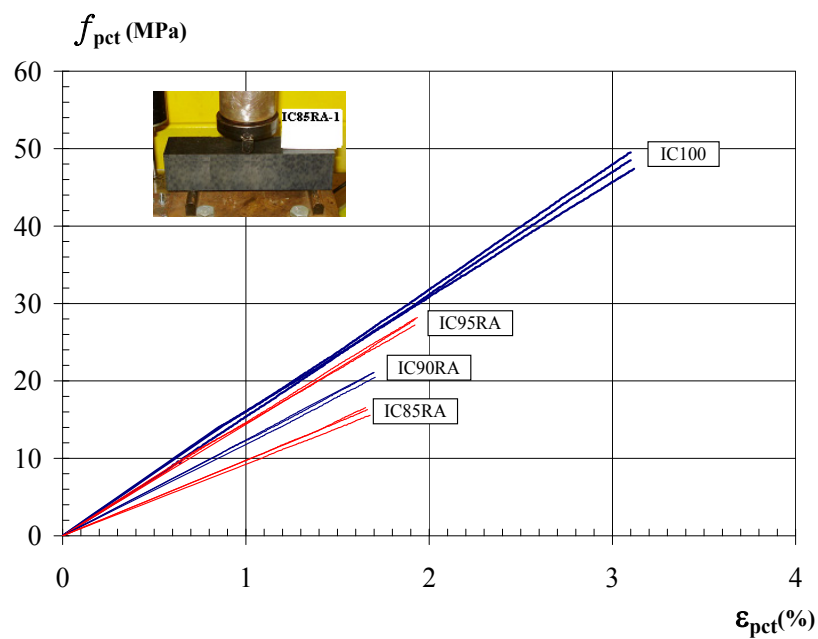


Fig.5.10- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, IC-RA.

Provete	$f_{pct,i}$ [MPa]	$f_{pct,m}$ [MPa]	$\epsilon_{pct,i}$ [%]	$\epsilon_{pct,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC100-1	49.1	48.7	3.07	3.09	1.57	1.57
IC100-2	49.5		3.09		1.65	
IC100-3	47.5		3.12		1.50	
IC95DC-1	41.7	41.5	2.86	2.86	1.47	1.40
IC95DC-2	42.4		2.85		1.41	
IC95DC-3	40.5		2.85		1.33	
IC90DC-1	37.7	36.8	2.78	2.78	1.36	1.37
IC90DC-2	36.5		2.78		1.37	
IC90DC-3	36.2		2.80		1.37	
IC85DC-1	33.2	32.0	2.71	2.71	1.24	1.24
IC85DC-2	32.0		2.82		1.20	
IC85DC-3	30.6		2.60		1.27	
IC80DC-1	25.9	26.9	2.64	2.64	1.03	1.05
IC80DC-2	26.8		2.64		1.02	
IC80DC-3	28.1		2.65		1.11	
IC75DC-1	22.2	22.5	2.42	2.42	0.93	0.91
IC75DC-2	22.4		2.41		0.88	
IC75DC-3	22.7		2.42		0.92	
IC70DC-1	19.3	19.6	2.40	2.40	0.73	0.79
IC70DC-2	20.0		2.40		0.85	
IC70DC-3	19.5		2.39		0.79	
IC95RA-1	28.2	27.77	1.94	1.93	1.45	1.41
IC95RA-2	27.9		1.92		1.45	
IC95RA-3	27.2		1.92		1.34	
IC90RA-1	20.4	20.86	1.71	1.70	1.21	1.21
IC90RA-2	21.1		1.70		1.27	
IC90RA-3	21.0		1.70		1.15	
IC85RA-1	15.6	16.13	1.68	1.67	0.99	1.07
IC85RA-2	16.3		1.66		1.02	
IC85RA-3	16.5		1.65		1.21	

Tabela 5.4- Resultados dos ensaios de flexão das argamassas poliméricas IC-DC, RA.

De forma idêntica à apresentada na Figura. 5.6, apresentam-se na Figura 5.10 alguns pormenores dos diversos tipos de provetes ensaiados à flexão, bem como os respectivos modos de rotura, sendo possível distinguir visualmente as diferentes resinas e composições com agregados de borracha ensaiadas.

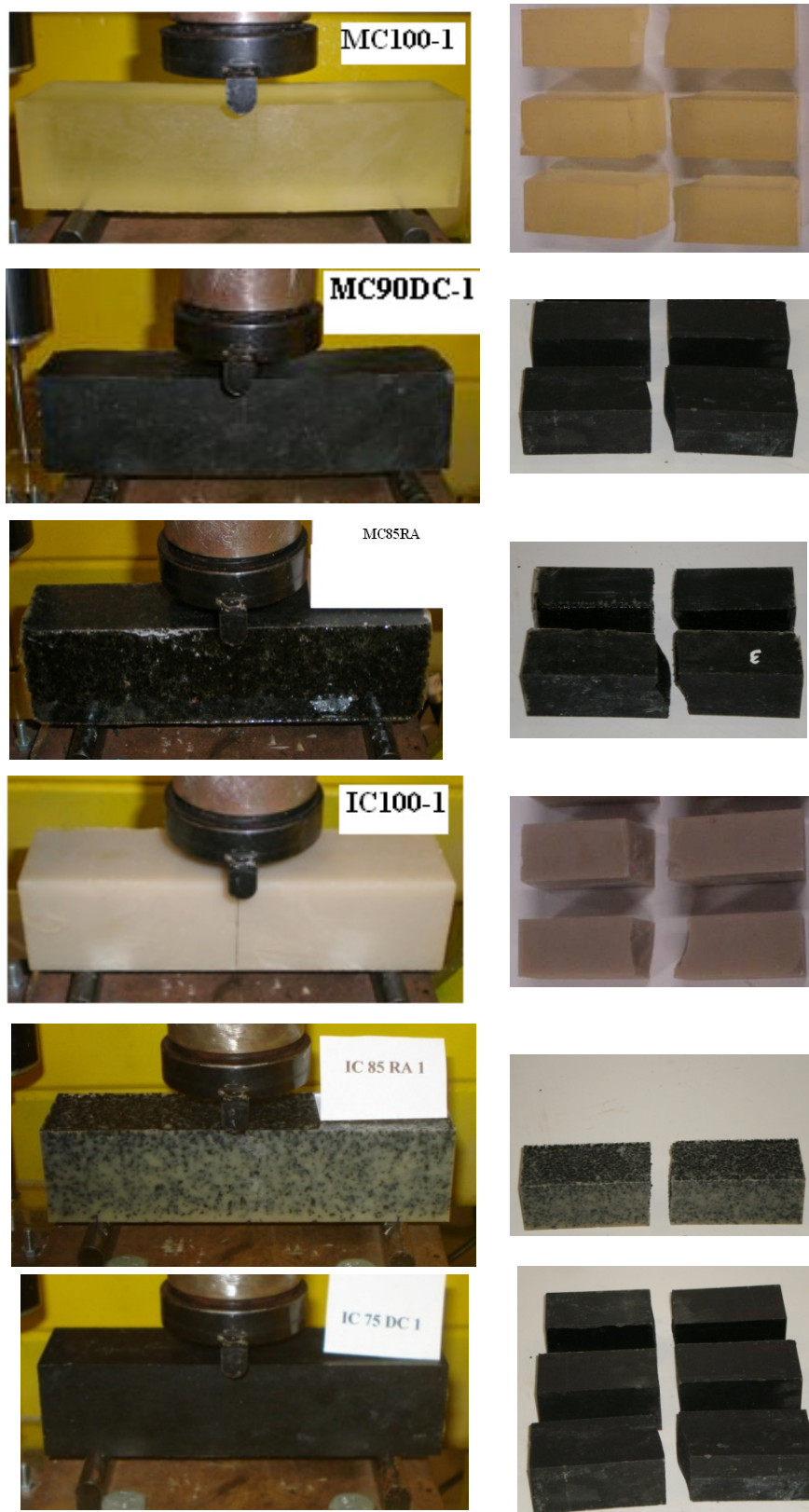


Fig.5.11- Pormenores de ensaios de flexão das argamassas poliméricas com agregados de borracha e respectivos modos de rotura.

5.1.5 - ANÁLISE DE RESULTADOS – ENSAIOS DE FLEXÃO

Da análise dos diagramas de tensão-deformação apresentados nas Figuras 5.2 a 5.5 e 5.7 a 5.10, e dos resultados obtidos (Tabelas 5.1 a 5,4), constata-se que o andamento dos gráficos tensão-deformação das argamassas poliméricas é idêntico ao dos gráficos tensão-deformação da resina respectiva, MC ou IC. Contudo, a inclinação dos diagramas varia com a alteração da percentagem dos agregados, obtendo-se um valor da tensão de rotura (f_{pct}) e da extensão de rotura (ϵ_{pct}), menor ou maior, consoante se aumenta ou diminui a percentagem dos agregados. Verificando-se assim, um decréscimo da tensão, da extensão e do módulo de elasticidade à medida que é incrementada a percentagem dos agregados.

Apresentam-se nos gráficos das figuras seguintes, a resistência à tracção por flexão, a extensão de rotura, e o módulo de elasticidade dos diversos tipos das argamassas poliméricas em função do incremento das percentagens em peso dos agregados. Nas Tabelas 5.5 e 5.6, estão apresentados os resultados das perdas, em termos percentuais, das tensões de rotura, extensões de rotura, e do módulo de elasticidade dos provetes das diversas argamassas poliméricas analisadas. Esta perda é obtida, comparando os resultados alcançados com os valores médios dos provetes de referência com 100% de resina MC ou IC.

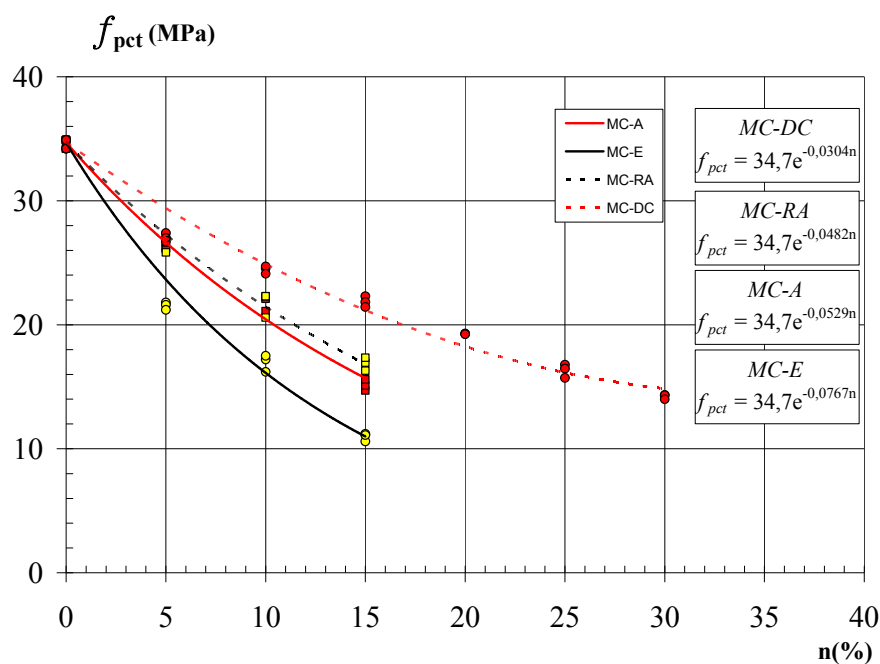


Fig.5.12- Resistências à tracção por flexão das argamassas poliméricas, com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).

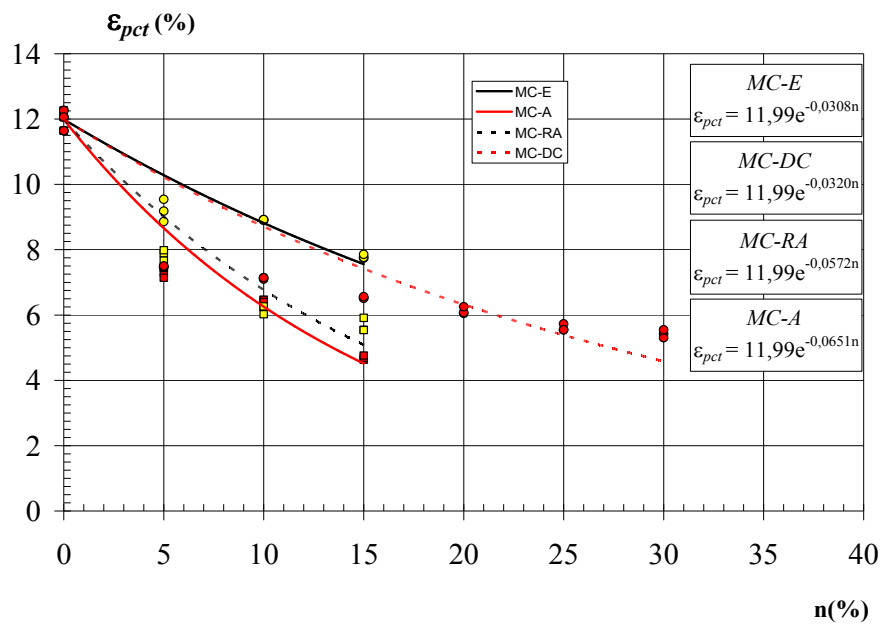


Fig.5.13- Extensão de rotura à tracção por flexão, das argamassas poliméricas, com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).

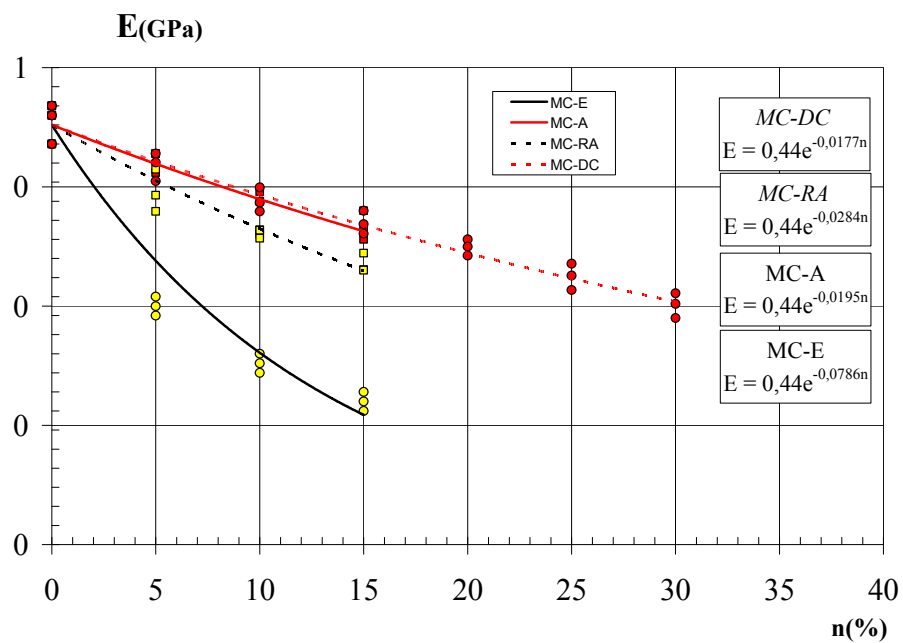


Fig.5.14- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas, com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).

Provete	f_{pct} [MPa]	Perda [%]	Δ [%]	ε_{pct} [%]	Perda [%]	Δ [%]	E [GPa]	Perda [%]	Δ [%]
MC100	34.7	-	-	11.99	-	-	0.44	-	-
MC95A	26.2	25	25	7.29	39	39	0.40	9	9
MC90A	21.8	37	13	6.44	46	7	0.35	20	11
MC85A	15.1	56	19	4.69	61	15	0.33	25	5
MC95E	21.5	38	38	9.19	23	23	0.25	44	44
MC90E	17.0	51	13	8.91	26	2	0.17	61	17
MC85E	11.0	68	17	7.79	35	9	0.16	64	3
MC95DC	27.0	22	22	7.48	38	38	0.40	9	9
MC90DC	24.5	30	7	7.13	41	3	0.36	19	10
MC85DC	21.9	37	8	6.53	46	5	0.35	22	3
MC80DC	19.3	44	7	6.13	49	3	0.32	27	5
MC75DC	16.3	53	8	5.61	53	4	0.28	37	9
MC70DC	14.2	59	6	5.43	55	2	0.25	43	7
MC95RA	25.4	27	27	7.47	38	38	0.37	17	17
MC90RA	21.7	37	11	6.17	49	11	0.33	27	10
MC85RA	16.9	51	14	5.67	53	4	0.29	34	7

Tabela 5.5- Comparação das características mecânicas (f_{pct} , ε_{pct} e E) das argamassas poliméricas, com a resina MC.

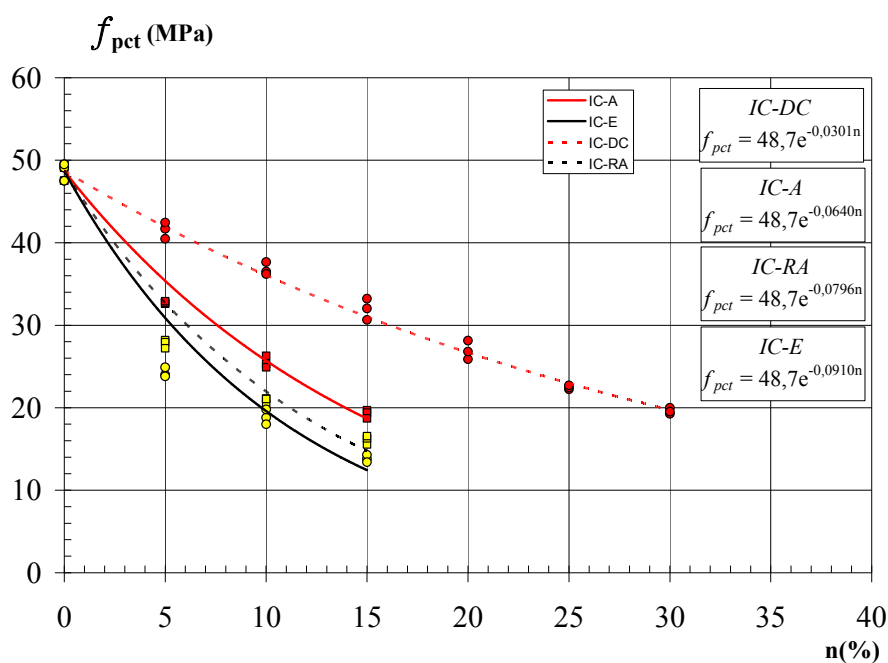


Fig.5.15- Resistências à tração por flexão das argamassas poliméricas, com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).

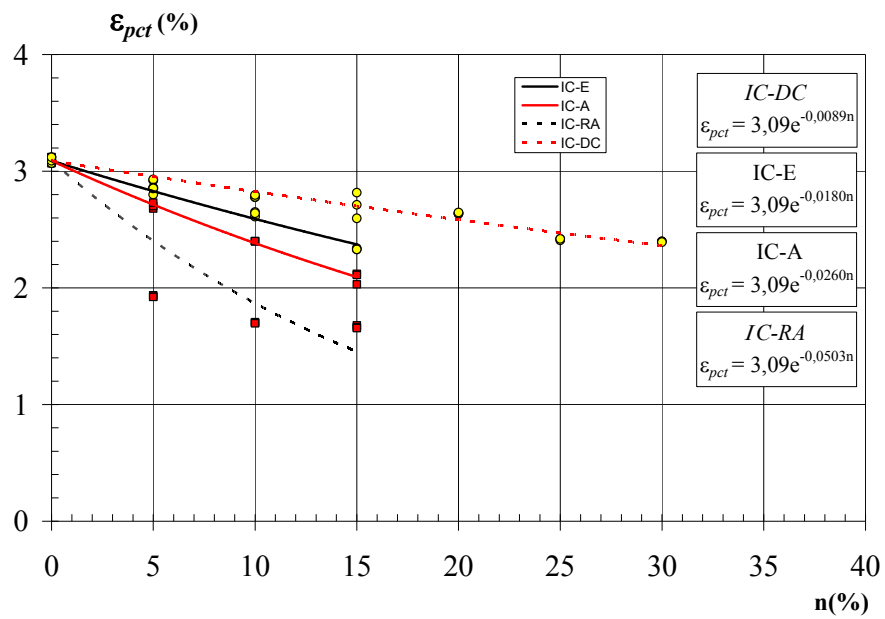


Fig.5.16- Extensão de rotura à tracção por flexão, das argamassas poliméricas, com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).

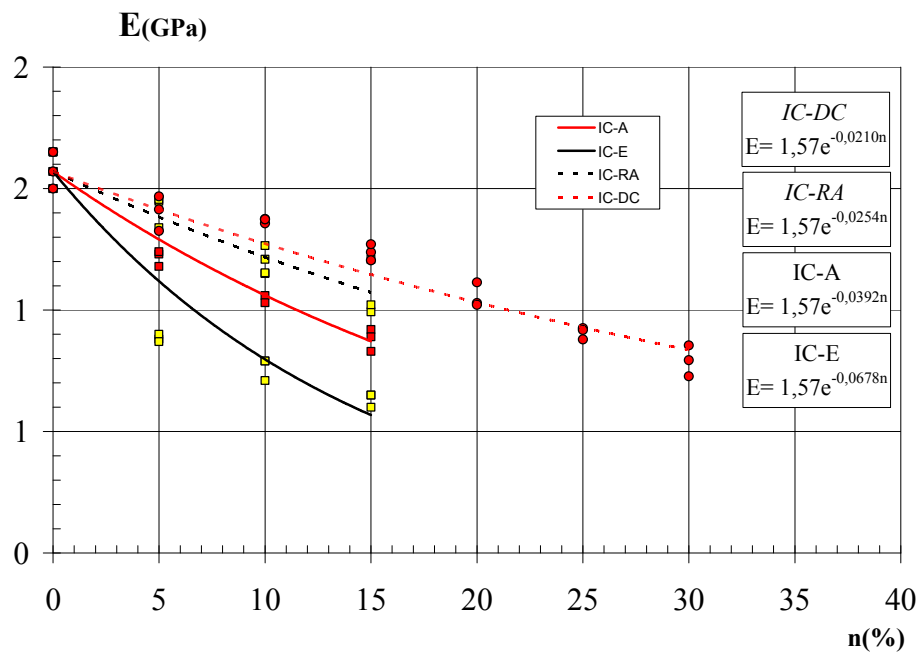


Fig.5.17- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas, com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados (Cortiça ou Borracha).

Provete	f_{pct} [MPa]	Perda [%]	Δ [%]	ε_{pct} [%]	Perda [%]	Δ [%]	E [GPa]	Perda [%]	Δ [%]
IC100	48.7	-	-	3.09	-	-	1.57	-	-
IC95A	32.7	35	35	2.70	18	18	1.22	23	23
IC90A	25.5	50	14	2.40	27	9	1.08	31	9
IC85A	19.3	62	12	2.09	37	9	0.88	44	13
IC95E	24.2	52	52	2.88	13	13	0.88	44	44
IC90E	18.9	63	11	2.63	20	8	0.76	51	8
IC85E	13.8	73	10	2.3	29	9	0.63	60	8
IC95DC	41.5	15	15	2.86	8	8	1.40	11	11
IC90DC	36.8	24	10	2.78	10	2	1.37	13	2
IC85DC	32.0	34	10	2.71	12	2	1.24	21	8
IC80DC	26.9	45	10	2.64	15	2	1.05	33	12
IC75DC	22.5	54	9	2.42	22	7	0.91	42	9
IC70DC	19.6	60	6	2.40	23	1	0.79	50	7
IC95RA	27.8	43	43	1.93	38	38	1.41	10	10
IC90RA	20.9	57	14	1.70	45	7	1.21	23	13
IC85RA	16.1	67	10	1.67	46	1	1.07	32	9

Tabela 5.6- Comparação das características mecânicas (f_{pcb} , ε_{pct} e E), das argamassas poliméricas, com a resina IC.

5.1.5.1 - EFEITO DO TIPO DE RESINA – ENSAIO DE FLEXÃO

No que diz respeito ao efeito do tipo das resinas (MC e IC) no comportamento mecânico das argamassas poliméricas, constata-se que em termos de resistência à tracção por flexão, para a mesma proporção (resina/agregado), as argamassas epoxídicas com base na resina IC, apresentam maiores valores de resistência, em média de 18% superior, em relação às argamassas epoxídicas, com a resina MC. O módulo de elasticidade também é superior para as argamassas epoxídicas com base de resina IC, com valores médios superiores na ordem de 68%. Todavia, a extensão de rotura regista valores médios 65% superiores nas argamassas com base em resina MC.

Nas Figuras 5.18 a 5.23 apresenta-se uma comparação em termos de tensão, extensão e módulo de elasticidade dos dois tipos de resina com os diversos tipos de agregados de cortiça (A e E) e de borracha (DC e RA). Salientando-se que o tipo de resina não tem uma influência significativa na tensão de rotura à tracção por flexão no caso das composições com agregados de borracha RA.

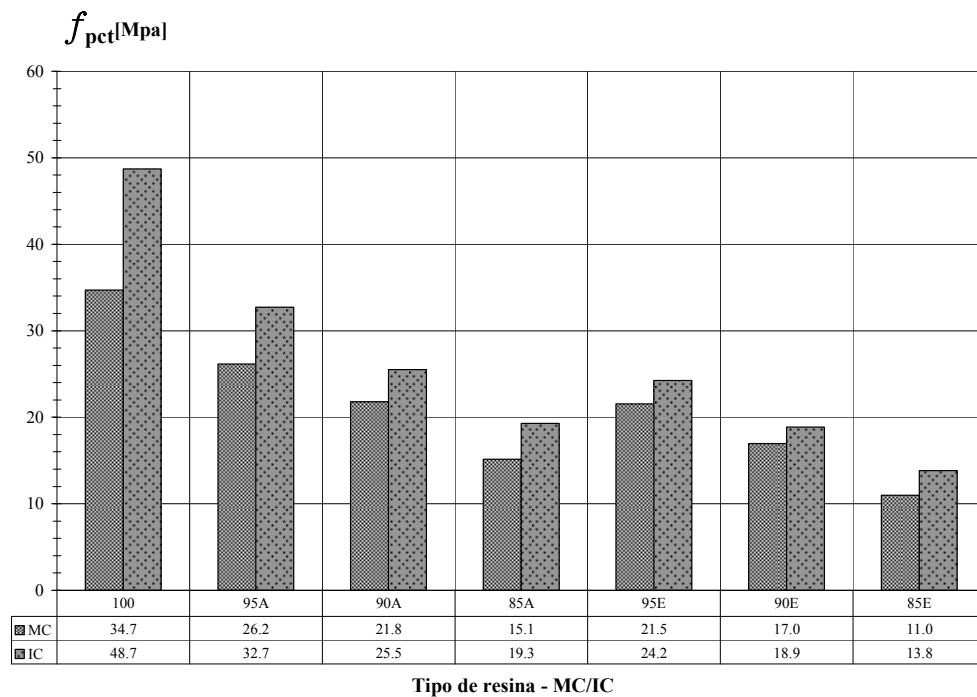


Fig.5.18- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à tracção por flexão das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).

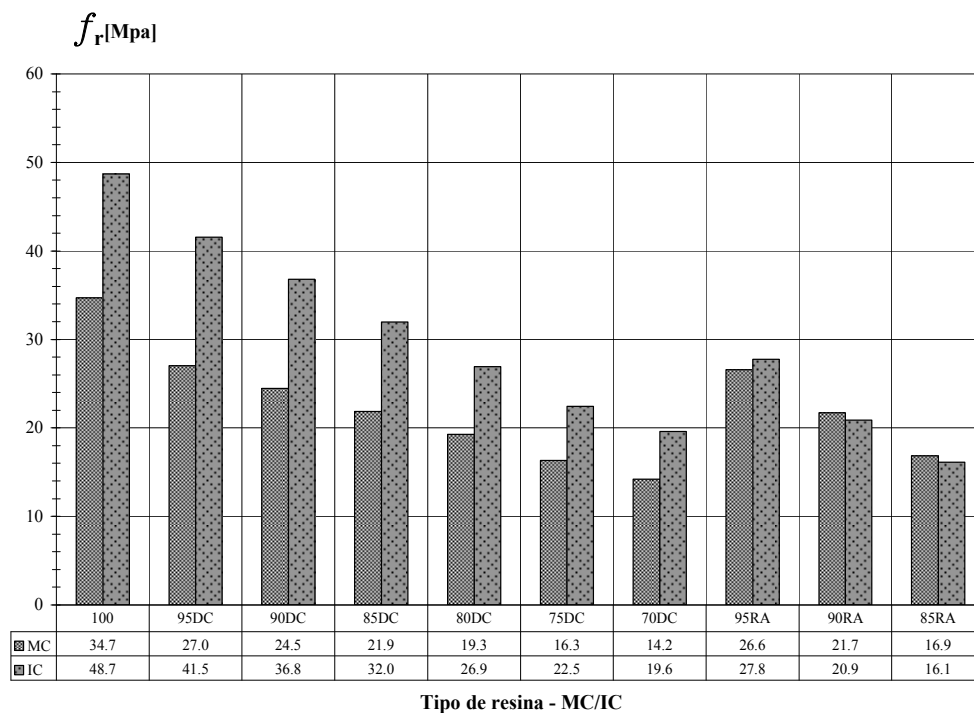


Fig.5.19- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à tracção por flexão das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).

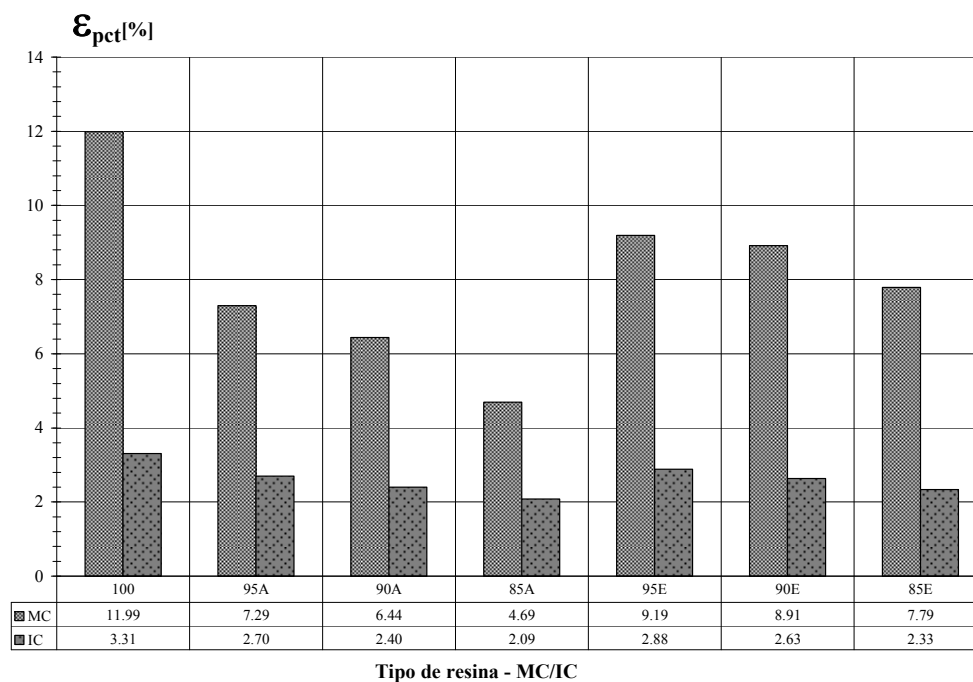


Fig.5.20- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).

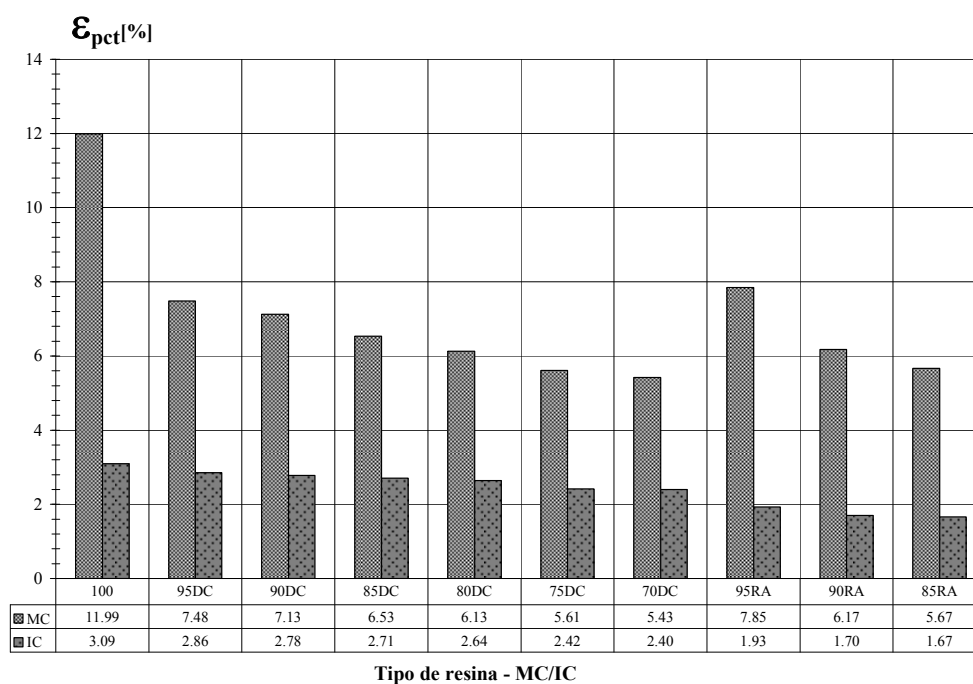


Fig.5.21- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).

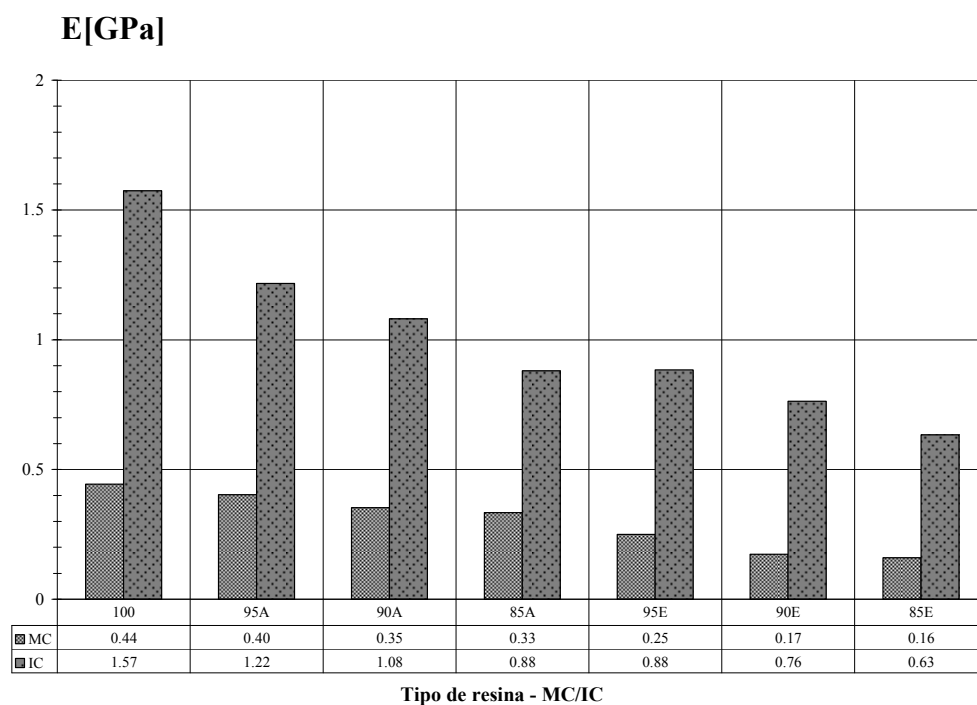


Fig.5.22- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).

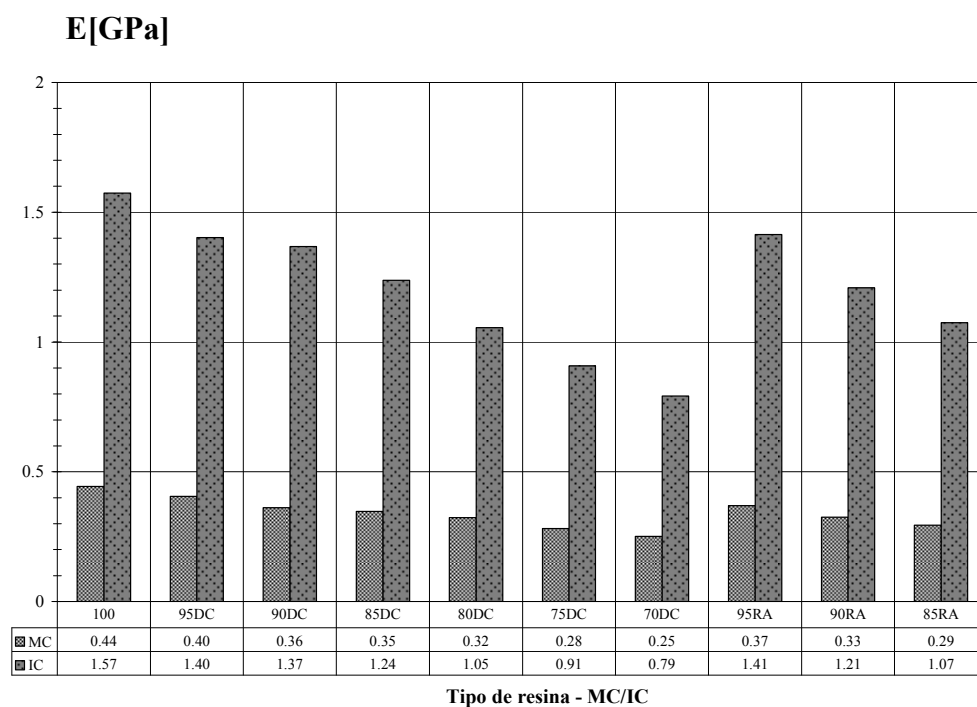


Fig.5.23- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).

5.1.5.2 - EFEITO DO TIPO DE AGREGADO – ENSAIO DE FLEXÃO

Em termos da resistência à tracção por flexão, as argamassas epoxídicas com agregados de maiores granulometrias (E e RA), apresentam menores valores de resistência mecânica face às argamassas com agregados mais finos (A e DC).

As argamassas poliméricas que apresentam maiores valores da tensão de rotura são aquelas que nas suas composições têm o agregado DC (pó de borracha), quando comparado com as mesmas proporções dos outros agregados, independentemente do tipo da resina que as compõem. Apresenta-se na figura seguinte o efeito dos agregados na resistência à tracção por flexão.

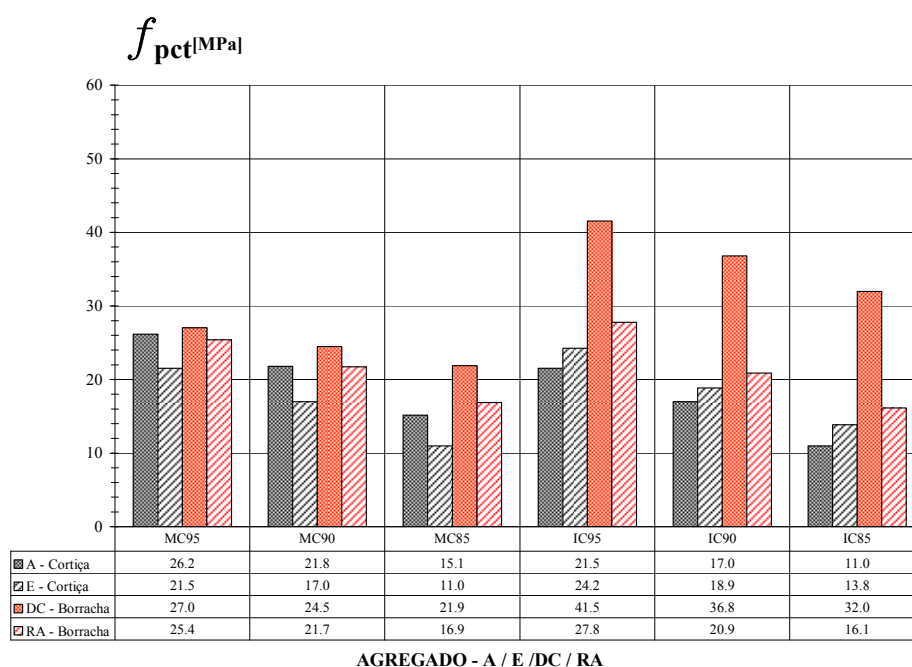


Fig.5.24- Efeito dos agregados na resistência à tracção por flexão.

No que diz respeito à extensão de rotura, constata-se que as argamassas poliméricas com granulados de cortiça (E), independentemente do tipo de resina que as compõem, apresentam maiores valores de extensão de rotura à flexão em comparação com as argamassas poliméricas compostas por pó de cortiça (A). Constata-se que para as gamas de argamassas com resina MC e agregado E, independentemente das proporções das misturas, apresentam valores de extensão superiores às argamassas poliméricas com MC e restantes agregados.

Relativamente aos agregados de borracha, as argamassas com agregado mais fino (DC), apresentam valores de extensão superiores quando se comparam com as argamassas com agregados mais grossos (RA).

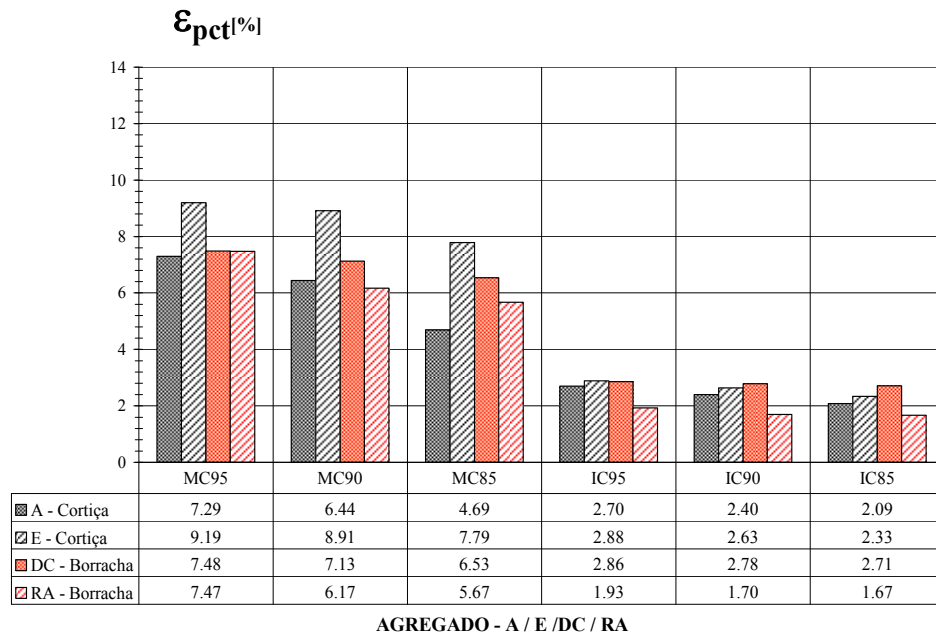


Fig.5.25- Extensão de rotura. Efeito dos agregados.

Em termos de módulo de elasticidade, as argamassas epoxídicas com agregados mais finos (A e DC) apresentam maiores valores comparativamente com as argamassas de agregados de maiores granulometrias (E e RA) (Figuras 5.26).

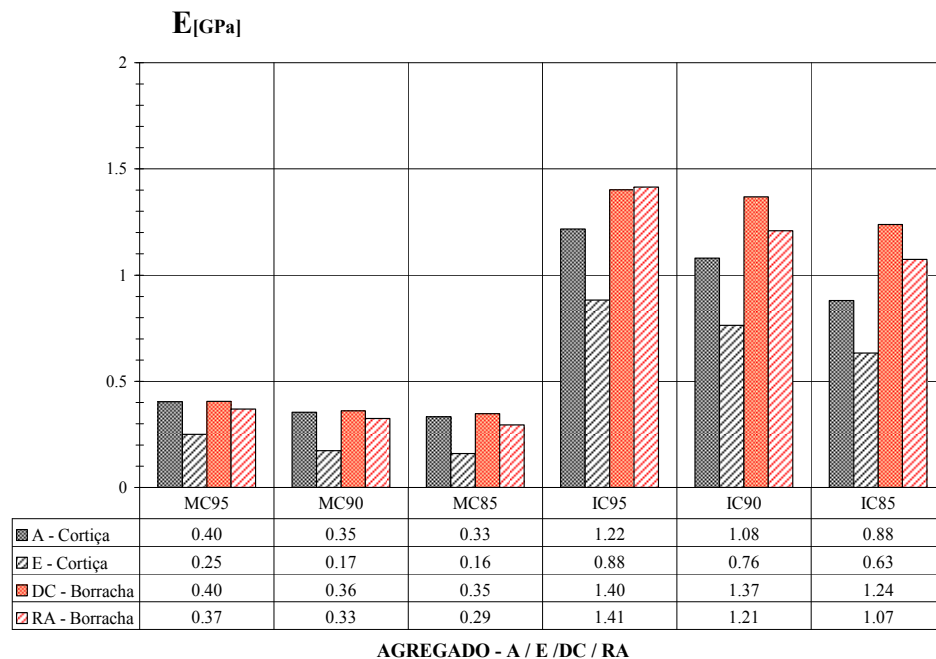


Fig.5.26- Módulo de Elasticidade. Efeito dos agregados.

5.2 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO MONOTÓNICA

Apresentam-se em seguida, os resultados obtidos com os ensaios de compressão monotónica dos provetes de argamassas poliméricas. No sentido de poder comparar os resultados obtidos, consideraram-se como referência os provetes de resina IC e MC, cuja resina serviu como ligante nos diversos tipos de argamassas poliméricas desenvolvidas.

Os resultados são apresentados por grupo de acordo com as suas características e não pela ordem pela qual foram ensaiados. Deste modo, em qualquer das séries são apresentadas curvas da evolução da tensão de compressão (f_{pc}) em função da extensão axial (ϵ_{pc}) das argamassas epoxídicas do mesmo tipo, bem como das resinas correspondentes.

A seguir aos diagramas são apresentadas tabelas com os resultados obtidos nos ensaios.

5.2.1 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA IC E CORTIÇA

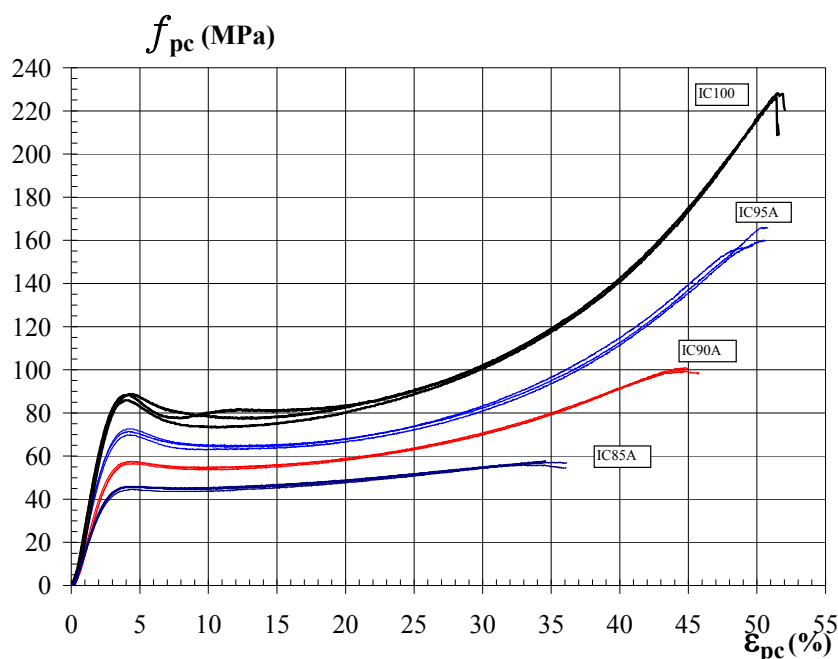


Fig.5.27- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-A.

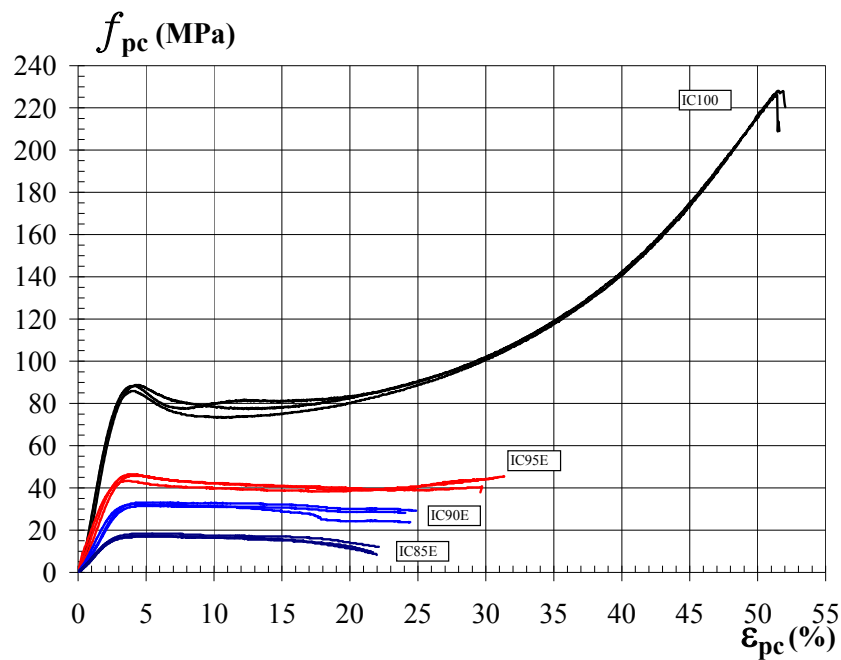


Fig.5.28- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-E.

Proвете	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC100-1	87.6	87.3	3.81	3.67	224.0	226.0	223.9	217.6	51.98	51.86	3.64	3.62
IC100-2	88.2		3.78		226.0		209.0		51.59		3.64	
IC100-3	86.2		3.43		228.0		220.0		52.02		3.58	
IC95A-1	67.5	69.0	3.79	3.66	157.6	161.1	157.6	161.0	48.00	47.57	2.69	2.68
IC95A-2	70.8		3.51		166.0		165.6		47.70		2.69	
IC95A-3	68.6		3.68		159.6		159.9		47.00		2.65	
IC90A-1	55.1	55.5	3.36	3.35	99.7	99.8	98.6	99.4	41.90	42.47	1.87	1.87
IC90A-2	56.0		3.35		100.6		100.6		42.50		1.85	
IC90A-3	55.3		3.35		99.0		98.9		43.00		1.89	
IC85A-1	42.0	42.9	3.23	3.26	57.6	57.1	57.6	56.4	34.55	35.57	1.28	1.33
IC85A-2	44.3		3.32		56.5		54.6		36.04		1.39	
IC85A-3	42.4		3.22		57.2		56.9		36.13		1.31	
IC95E-1	45.4	43.9	3.30	3.23	45.7	45.6	45.7	45.57	30.6	30.55	1.89	1.92
IC95E-2	42.8		3.20		45.6		45.6		31.4		1.97	
IC95E-3	43.4		3.19		45.4		45.4		29.7		1.91	
IC90E-1	30.1	29.2	2.94	3.05	33.0	32.3	29.1	26.97	24.9	24.46	1.18	1.18
IC90E-2	28.6		3.05		32.3		23.7		24.4		1.25	
IC90E-3	29.0		3.16		31.5		28.1		24.1		1.12	
IC85E-1	16.9	16.5	2.93	2.93	17.4	17.6	11.4	12.69	19.95	19.93	0.70	0.70
IC85E-2	15.6		2.84		16.9		12.3		20.13		0.69	
IC85E-3	16.9		3.02		18.5		14.3		19.72		0.71	

Tabela 5.7- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas IC com os agregados de cortiça (A ou E).

5.2.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS COM RESINA MC E CORTIÇA

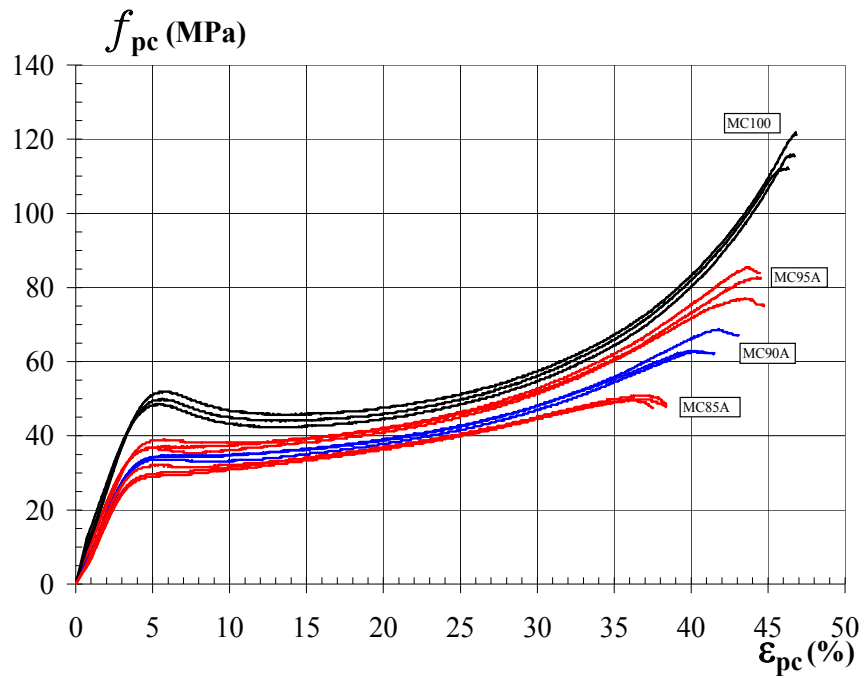


Fig.5.29- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas MC-A.

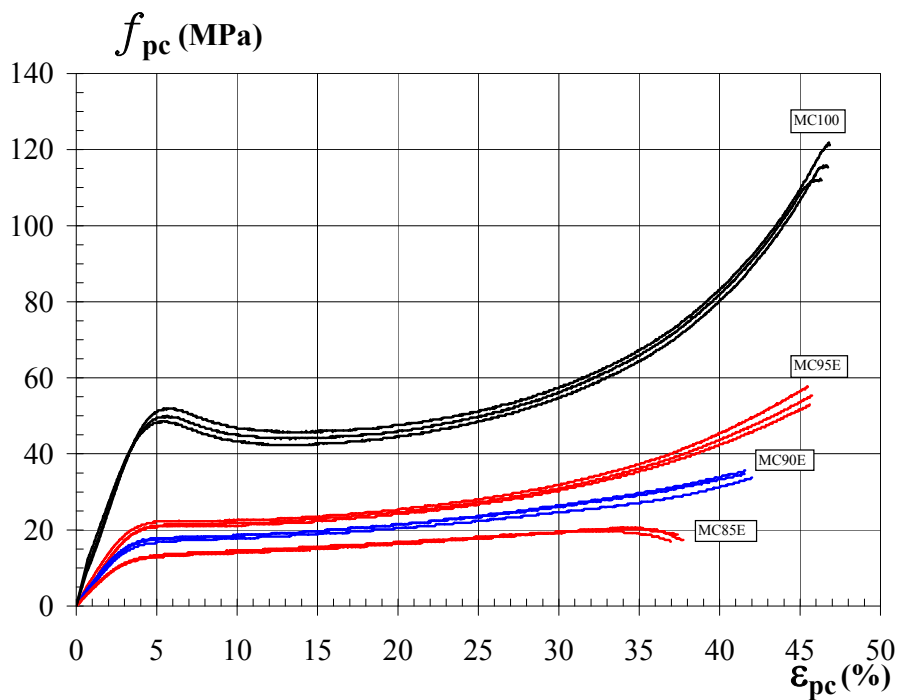


Fig.5.30- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas MC-E.

Provete	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100-1	49.1	49.4	4.91	4.92	112.0	116.1	112.0	116.1	46.35	46.65	1.10	1.11
MC100-2	50.8		4.90		121.1		121.1		46.85		1.09	
MC100-3	48.1		4.95		115.4		115.4		46.74		1.14	
MC95A-1	38.2	37.2	4.78	4.8	85.43	81.8	84.0	80.4	44.48	44.6	0.95	0.95
MC95A-2	36.8		4.80		82.80		82.5		44.54		0.91	
MC95A-3	36.8		4.86		77.13		74.9		44.74		0.98	
MC90A-1	33.5	33.4	4.56	4.6	62.89	64.8	62.4	63.9	41.06	41.9	0.90	0.90
MC90A-2	33.8		4.50		68.78		67.2		43.08		0.92	
MC90A-3	33.0		4.60		62.74		62.3		41.53		0.88	
MC85A-1	30.7	29.2	4.01	4.12	49.7	50.0	48.2	48.1	38.39	38.10	0.89	0.83
MC85A-2	28.7		4.15		50.8		48.7		38.38		0.75	
MC85A-3	28.3		4.20		49.6		47.5		37.54		0.85	
MC95E-1	20.1	20.2	3.91	3.94	57.6	55.3	57.6	55.3	45.46	45.60	0.56	0.57
MC95E-2	19.6		3.90		55.3		55.3		45.75		0.58	
MC95E-3	21.0		4.01		53.1		53.1		45.60		0.57	
MC90E-1	15.2	15.9	3.62	3.56	33.8	34.7	33.79	34.73	42.02	41.72	0.41	0.43
MC90E-2	15.9		3.57		34.8		34.76		41.54		0.43	
MC90E-3	16.6		3.48		35.7		35.66		41.60		0.45	
MC85E-1	11.9	11.7	3.30	3.30	19.7	20.0	16.89	17.66	36.97	37.37	0.31	0.30
MC85E-2	11.8		3.48		20.1		17.34		37.75		0.28	
MC85E-3	11.4		3.12		20.1		18.76		37.39		0.30	

Tabela 5.8- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas MC com os agregados de cortiça (A ou E).

5.2.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE RESINA IC COM BORRACHA

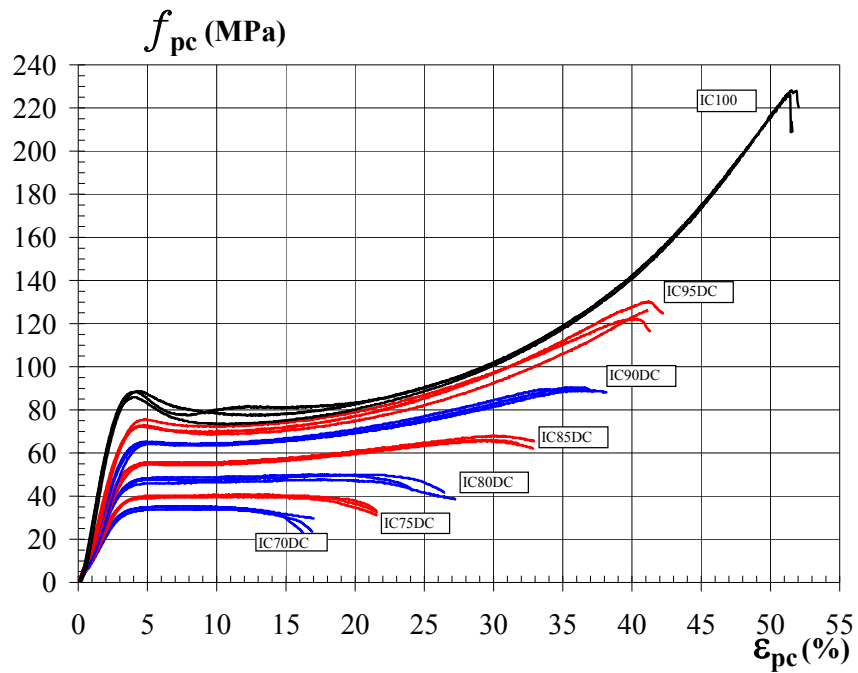


Fig.5.31- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-DC.

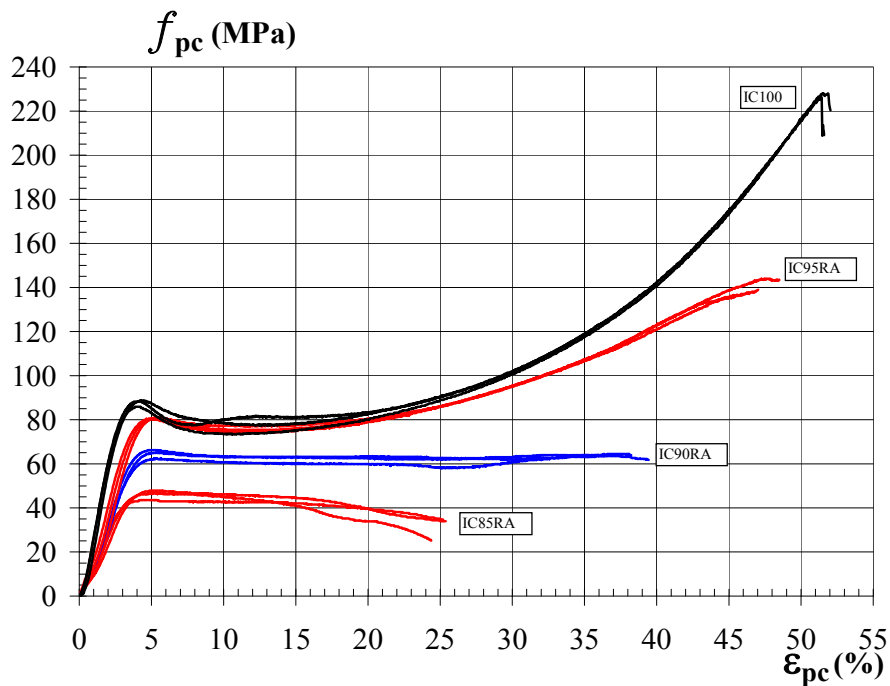


Fig.5.32- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas IC-RA.

Provete	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC100-1	87.6	87.3	3.91	3.81	224.0	226.0	223.9	217.6	51.98	51.86	3.64	3.62
IC100-2	88.2		3.88		226.0		209.0		51.59		3.64	
IC100-3	86.2		3.63		228.0		220.0		52.02		3.58	
IC95DC-1	73.9	72.7	3.34	3.55	124.4	126.7	116.5	122.5	41.29	41.49	2.74	2.62
IC95DC-2	73.1		3.70		129.9		125.2		42.14		2.61	
IC95DC-3	71.2		3.60		125.8		125.8		41.05		2.50	
IC90DC-1	63.2	63.6	3.35	3.42	90.4	89.7	88.4	88.5	37.16	37.40	1.95	1.96
IC90DC-2	63.3		3.40		89.5		88.8		36.90		1.94	
IC90DC-3	64.4		3.50		89.1		88.2		38.15		2.00	
IC85DC-1	54.9	54.9	3.10	3.20	65.6	66.1	62.3	64.0	32.80	32.51	1.65	1.67
IC85DC-2	55.8		3.20		66.6		65.3		32.91		1.73	
IC85DC-3	53.9		3.30		66.2		64.4		31.81		1.62	
IC80DC-1	46.4	47.9	2.98	3.03	47.8	49.3	38.7	44.3	27.20	26.59	1.23	1.33
IC80DC-2	48.7		3.10		50.0		42.6		26.13		1.37	
IC80DC-3	48.6		3.01		50.0		51.6		26.44		1.40	
IC75DC-1	40.7	40.3	3.00	2.77	39.9	40.3	31.1	31.9	21.55	21.55	1.18	1.08
IC75DC-2	39.6		2.90		40.2		32.3		21.54		1.04	
IC75DC-3	40.7		2.40		40.7		32.4		21.56		1.01	
IC70DC-1	32.6	32.2	2.60	2.64	34.8	34.7	22.9	25.4	12.24	15.38	0.92	0.94
IC70DC-2	31.7		2.63		34.0		23.5		16.90		0.90	
IC70DC-3	32.4		2.70		35.4		29.7		17.01		1.00	
IC95RA-1	81.0	80.7	3.95	3.87	139.0	140.2	139.0	140.1	47.02	47.31	2.38	2.43
IC95RA-2	80.7		3.80		144.0		143.5		48.50		2.48	
IC95RA-3	80.5		3.86		137.7		137.7		46.42		2.43	
IC90RA-1	60.3	62.3	3.53	3.49	64.1	65.2	64.1	63.3	36.37	38.02	1.87	1.92
IC90RA-2	65.3		3.44		66.2		64.0		38.24		1.99	
IC90RA-3	61.3		3.51		65.3		61.8		39.45		1.90	
IC85RA-1	41.7	43.9	2.80	2.84	43.6	46.0	34.7	31.3	25.21	24.99	1.25	1.26
IC85RA-2	43.8		2.82		46.6		25.2		24.38		1.27	
IC85RA-3	46.2		2.91		47.8		34.0		25.38		1.26	

Tabela 5.9- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas IC com os agregados de borracha (DC ou RA).

5.2.4 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE RESINA MC COM BORRACHA

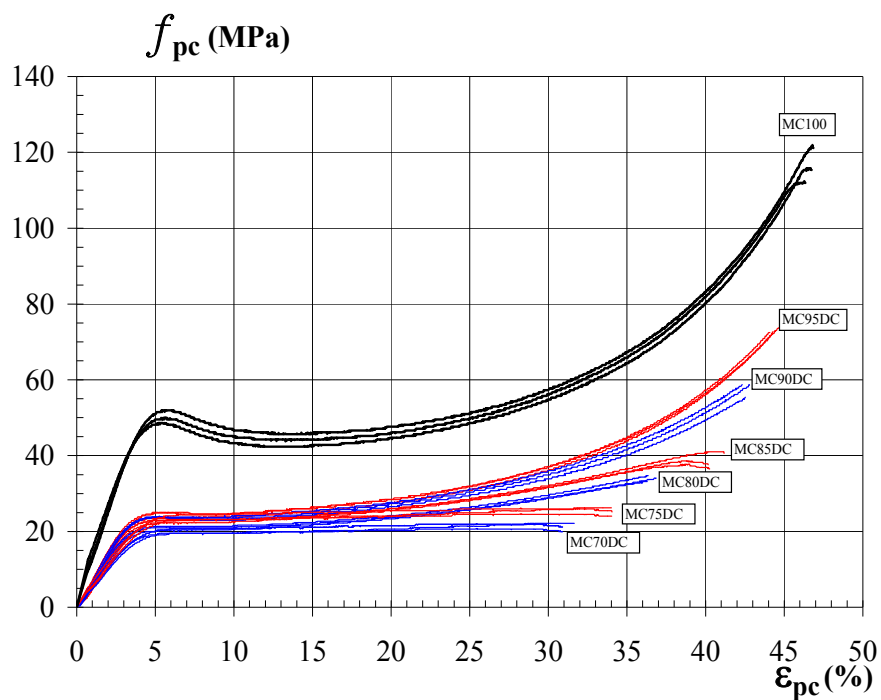


Fig.5.33- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-DC.

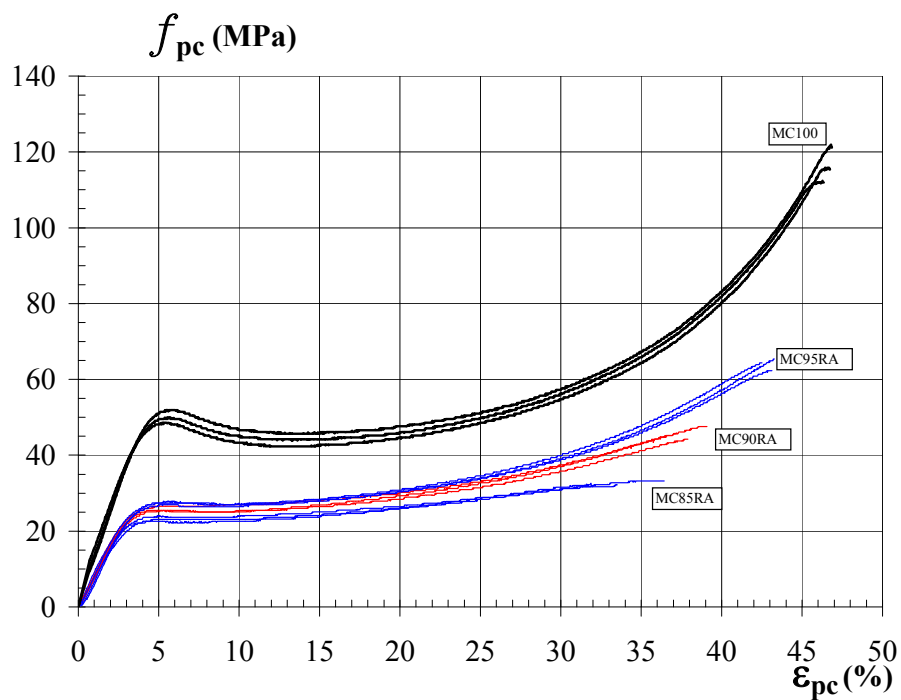


Fig.5.34- Diagramas tensão-deformação dos provetes de argamassas poliméricas, MC-RA.

Provete	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100-1	49.1	49.4	4.91	4.92	112.0	116.1	112.0	116.1	46.35	46.65	1.10	1.11
MC100-2	50.8		4.90		121.1		121.1		46.85		1.09	
MC100-3	48.1		4.95		115.4		115.4		46.74		1.14	
MC95DC-1	23.6	23.2	3.98	3.90	73.8	72.8	73.8	72.8	44.64	44.39	0.78	0.76
MC95DC-2	23.7		3.90		72.6		72.6		44.31		0.73	
MC95DC-3	22.4		3.83		72.1		72.1		44.22		0.76	
MC90DC-1	21.9	21.8	3.71	3.65	55.4	57.6	55.4	57.6	42.52	42.54	0.67	0.69
MC90DC-2	21.2		3.57		58.6		58.6		42.79		0.68	
MC90DC-3	22.3		3.68		58.8		58.8		42.32		0.71	
MC85DC-1	22.1	21.4	3.70	3.68	40.6	38.3	40.6	38.3	41.17	40.53	0.66	0.65
MC85DC-2	21.3		3.65		37.8		37.8		40.15		0.63	
MC85DC-3	20.7		3.70		36.4		36.4		40.26		0.65	
MC80DC-1	20.5	21.2	3.70	3.67	34.8	34.0	34.8	34.0	37.82	37.94	0.59	0.58
MC80DC-2	21.2		3.60		33.1		33.1		37.92		0.58	
MC80DC-3	22.0		3.70		34.1		34.1		38.08		0.57	
MC75DC-1	19.3	19.3	3.52	3.58	24.0	25.3	24.0	25.3	34.01	34.04	0.54	0.55
MC75DC-2	19.2		3.61		26.2		26.2		34.00		0.57	
MC75DC-3	19.4		3.60		25.7		25.7		34.10		0.55	
MC70DC-1	18.8	19.3	4.85	4.85	20.79	21.6	20.0	21.1	30.9	31.15	0.44	0.44
MC70DC-2	19.1		4.90		22.08		22.1		31.6		0.42	
MC70DC-3	19.9		4.80		22.04		21.2		30.9		0.46	
MC95RA-1	25.5	25.2	3.69	3.66	65.3	64.0	65.3	64.0	43.26	42.99	0.83	0.82
MC95RA-2	25.6		3.70		64.4		64.4		42.50		0.80	
MC95RA-3	24.4		3.60		62.3		62.3		43.20		0.82	
MC90RA-1	23.5	23.0	3.51	3.35	48.1	46.5	48.1	46.5	37.00	38.04	0.81	0.80
MC90RA-2	24.0		3.32		47.2		47.2		39.23		0.78	
MC90RA-3	21.6		3.21		44.2		44.2		37.89		0.80	
MC85RA-1	21.0	21.0	3.00	3.07	31.9	32.6	31.9	32.6	32.14	33.43	0.76	0.76
MC85RA-2	20.5		2.80		32.7		32.7		33.73		0.75	
MC85RA-3	21.6		3.40		33.2		33.2		34.42		0.77	

Tabela 5.10- Resultados dos ensaios à compressão das argamassas poliméricas MC com os agregados de borracha (DC ou RA).

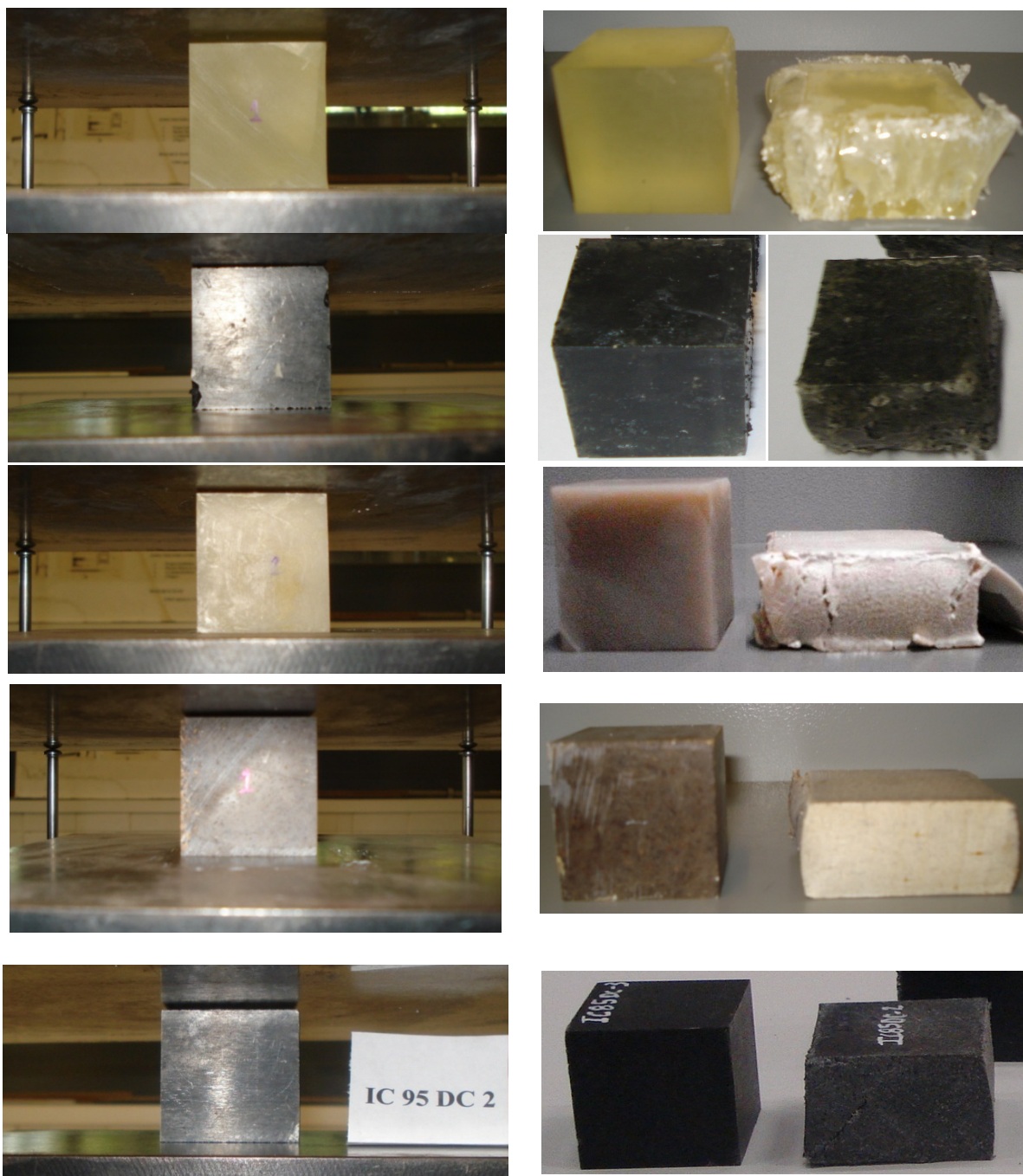


Fig.5.35- Pormenores dos ensaios à compressão monotónica e respectivos modos de rotura.

5.2.5 - ANÁLISE DE RESULTADOS – ENSAIOS DE COMPRESSÃO MONOTÔNICA

Da análise dos diagramas de tensão-extensão apresentados nas Figuras 5.27 a 5.34, constata-se que o andamento dos diagramas das argamassas poliméricas é idêntico ao andamento dos diagramas tensão-extensão da resina que lhes serviu de base. Verifica-se um decréscimo das tensões de cedência, das tensões máximas, das extensões na rotura e dos módulos de elasticidade à medida que é incrementada a percentagem dos agregados.

Apresentam-se, nos gráficos das figuras seguintes (5.36 a 5.41), as tensões de rotura, as extensões de rotura, e os módulos de elasticidade dos diversos tipos de argamassas poliméricas, em função do incremento das percentagens em peso dos agregados.

Nas Tabelas 5.11 e 5.12 apresentam-se, em termos percentuais, os resultados da diminuição na tensão, extensão de rotura e módulo de elasticidade, com o incremento da percentagem dos agregados. Esta perda é obtida, comparando os valores médios das grandezas dos provetes analisados com os valores médios dos provetes de referência (100% de resina) MC ou IC.

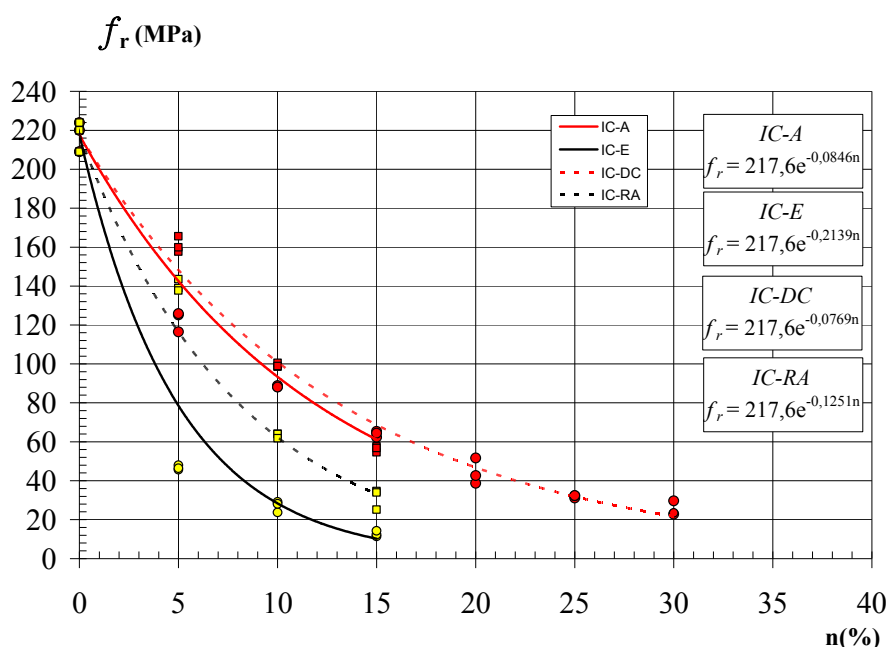


Fig.5.36- Resistência à compressão das argamassas poliméricas com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).

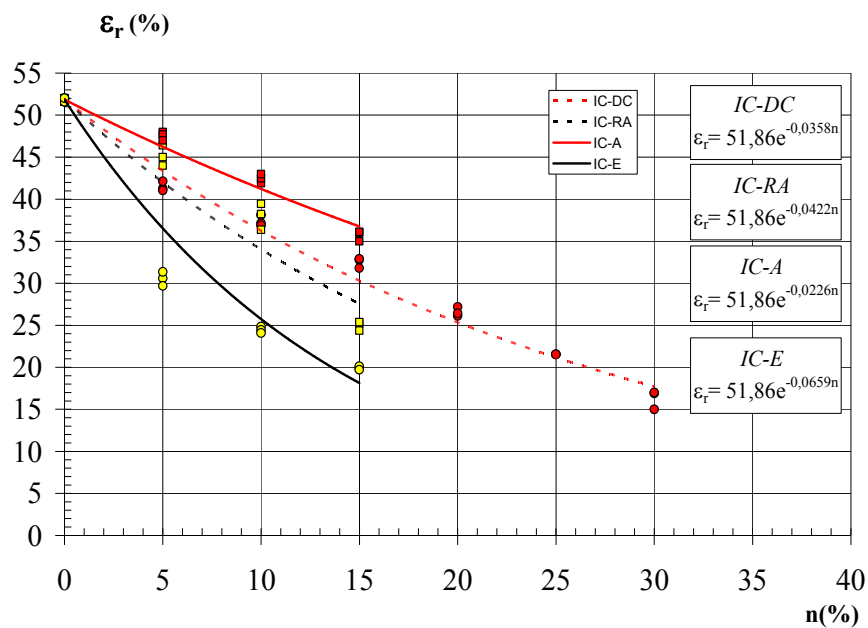


Fig.5.37- Extensão de rotura à compressão das argamassas poliméricas com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).

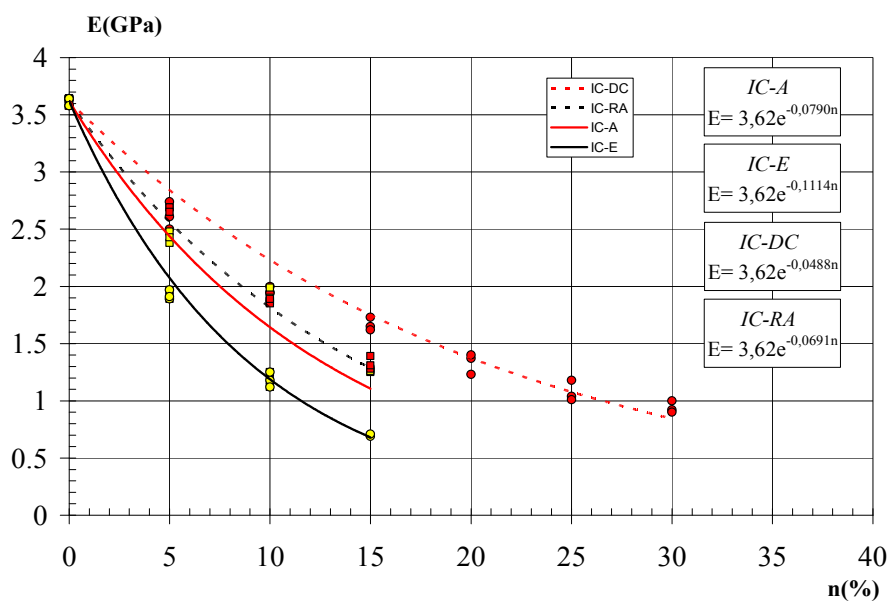


Fig.5.38- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas com resina IC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).

Provetes	f_r [MPa]	Perda [%]	Δ [%]	ε_r [%]	Perda [%]	Δ [%]	E [GPa]	Perda [%]	Δ [%]
IC100	217.6	-	-	51.86	-	-	3.62	-	-
IC95A	161.0	26	26	47.57	8	8	2.68	26	26
IC90A	99.4	54	28	42.47	18	10	1.87	48	22
IC85A	56.4	74	20	35.57	31	13	1.33	63	15
IC95E	45.6	79	79	30.55	41	41	1.92	47	47
IC90E	27.0	88	9	24.46	53	12	1.18	67	20
IC85E	12.7	94	7	19.93	62	9	0.70	81	13
IC95DC	122.5	44	44	41.49	20	20	2.62	28	28
IC90DC	88.5	59	16	37.40	28	8	1.96	46	18
IC85DC	64.0	71	11	32.51	37	9	1.67	54	8
IC80DC	44.3	80	9	26.59	49	11	1.33	63	9
IC75DC	31.9	85	6	21.55	58	10	1.08	70	7
IC70DC	25.4	88	3	15.38	70	12	0.94	74	4
IC95RA	140.1	36	36	47.31	9	9	2.43	33	33
IC90RA	63.3	71	35	38.02	27	18	1.92	47	14
IC85RA	31.3	86	15	24.99	52	25	1.26	65	18

Tabela 5.11- Comparação das características mecânicas (f_r , ε_r e E) das argamassas poliméricas com a resina IC.

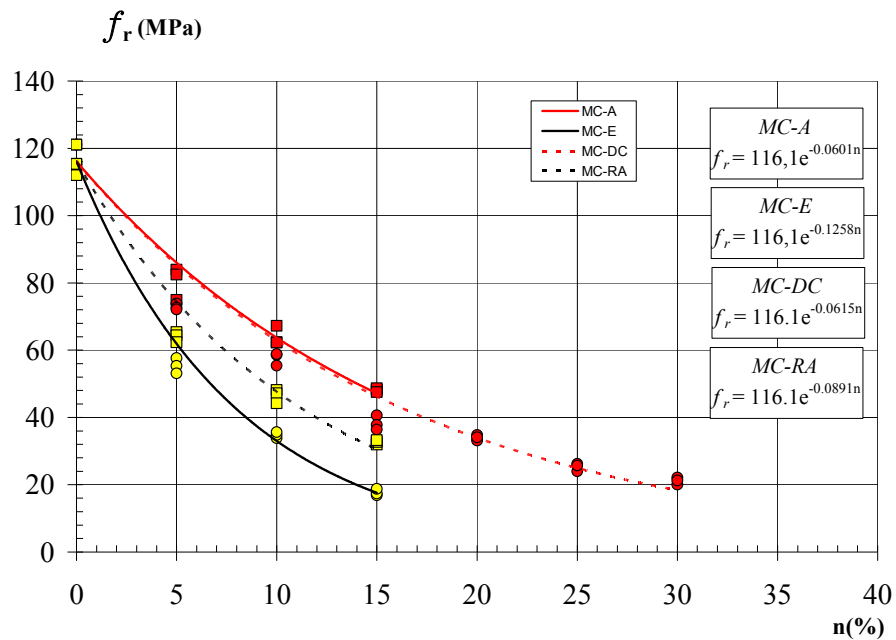


Fig.5.39- Resistência à compressão das argamassas poliméricas com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).

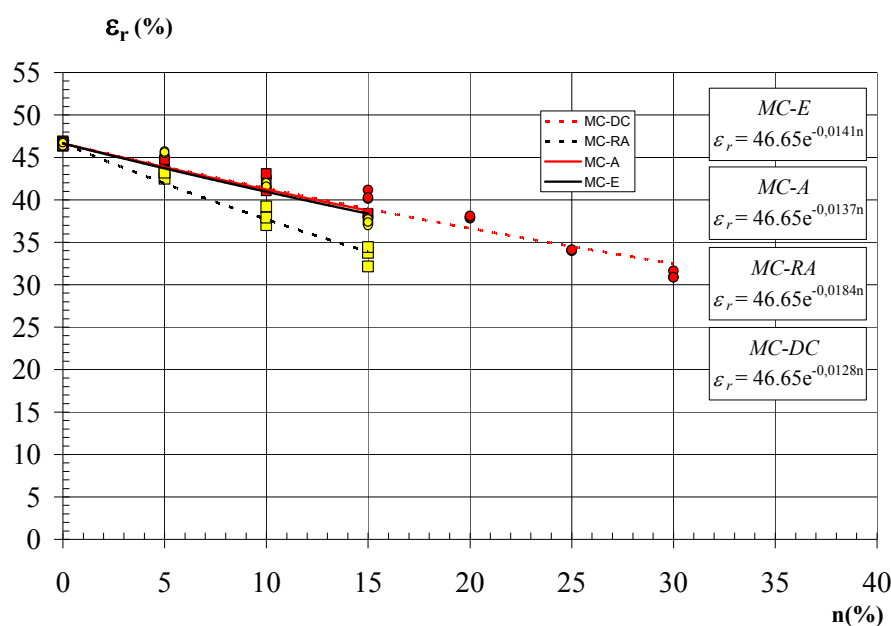


Fig.5.40- Extensão de rotura à compressão das argamassas poliméricas com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).

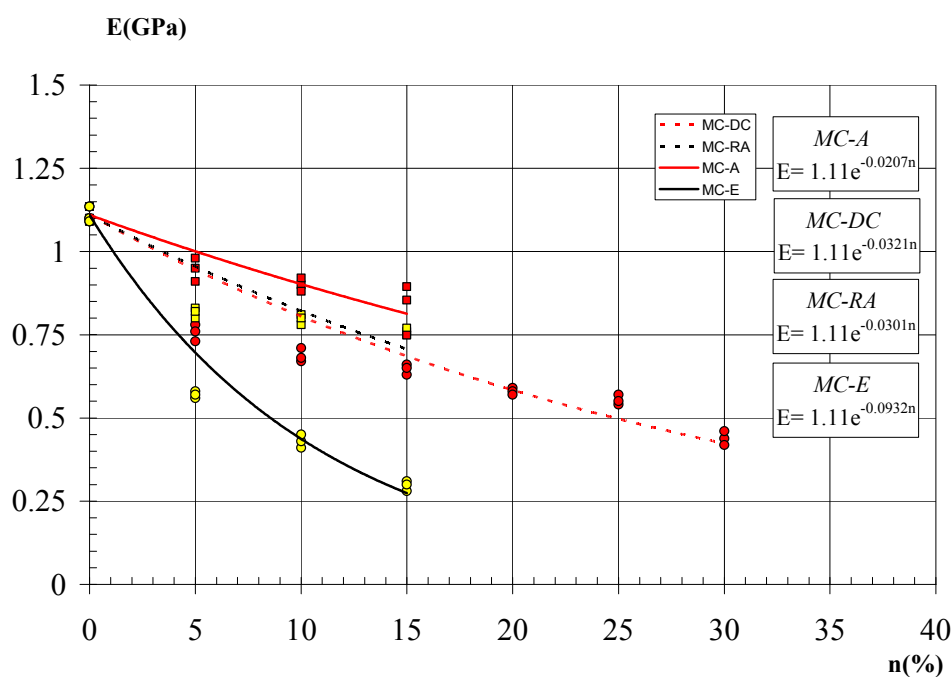


Fig.5.41- Módulo de elasticidade das argamassas poliméricas com resina MC, em função das percentagens em peso dos agregados de cortiça (A ou E) ou de borracha (DC ou RA).

Provetes	f_r [MPa]	Perda [%]	Δ [%]	ε_r [%]	Perda [%]	Δ [%]	E [GPa]	Perda [%]	Δ [%]
MC100	116.1	-	-	46.65	-	-	1.11	-	-
MC95A	80.4	31	31	44.59	4	4	0.95	15	15
MC90A	63.9	45	14	41.89	10	6	0.90	19	4
MC85A	48.1	59	14	38.10	18	8	0.83	25	6
MC95E	55.3	52	52	45.60	2	2	0.57	49	49
MC90E	34.7	70	18	41.72	11	8	0.43	61	13
MC85E	17.7	85	15	37.37	20	9	0.30	73	12
MC95DC	72.8	37	37	44.39	5	5	0.76	32	32
MC90DC	57.6	50	13	42.54	9	4	0.69	38	6
MC85DC	38.3	67	17	40.53	13	4	0.65	42	4
MC80DC	34.0	71	4	37.94	19	6	0.58	48	6
MC75DC	25.3	78	7	34.04	27	8	0.55	50	2
MC70DC	21.1	82	4	31.15	33	6	0.44	60	10
MC95RA	64.0	45	45	42.99	8	8	0.82	26	26
MC90RA	46.5	60	15	38.04	18	11	0.80	28	2
MC85RA	32.6	72	12	33.43	28	10	0.76	31	3

Tabela 5.12- Comparação das características mecânicas (f_r , ε_r e E) das argamassas poliméricas, com a resina MC.

5.2.5.1 - EFEITO DO TIPO DE RESINA – COMPRESSÃO MONOTÓNICA

Verifica-se que para a mesma proporção resina/agregado, os provetes de argamassas epoxídicas com base na resina IC apresentam, geralmente, valores mais elevados de resistência, comparativamente com as argamassas epoxídicas com base na resina MC. Apenas as argamassas IC-E apresentam valores de resistência cerca de 23% inferiores comparativamente às argamassas MC-E. Os provetes de argamassas IC-A apresentam valores de resistência à compressão 33% superiores aos provetes MC-A. No caso dos provetes de argamassas com agregados de borracha, IC-DC e IC-RA, os valores de resistência à compressão são 28% superiores aos correspondentes provetes de cortiça, MC-DC e MC-RA.

Da análise dos resultados, constata-se que o módulo de elasticidade é superior no caso das argamassas epoxídicas com base na resina IC, em cerca de 65% comparativamente com as argamassas com base na resina MC. Todavia é de realçar que a extensão de rotura é em média superior nos provetes de argamassas epoxídicas com base na resina MC.

Nas figuras seguintes (5.42 a 5.47), apresentam-se os gráficos mostrando a influência do tipo de resina e da sua quantidade nas características mecânicas das argamassas poliméricas com agregados de cortiça ou de borracha.

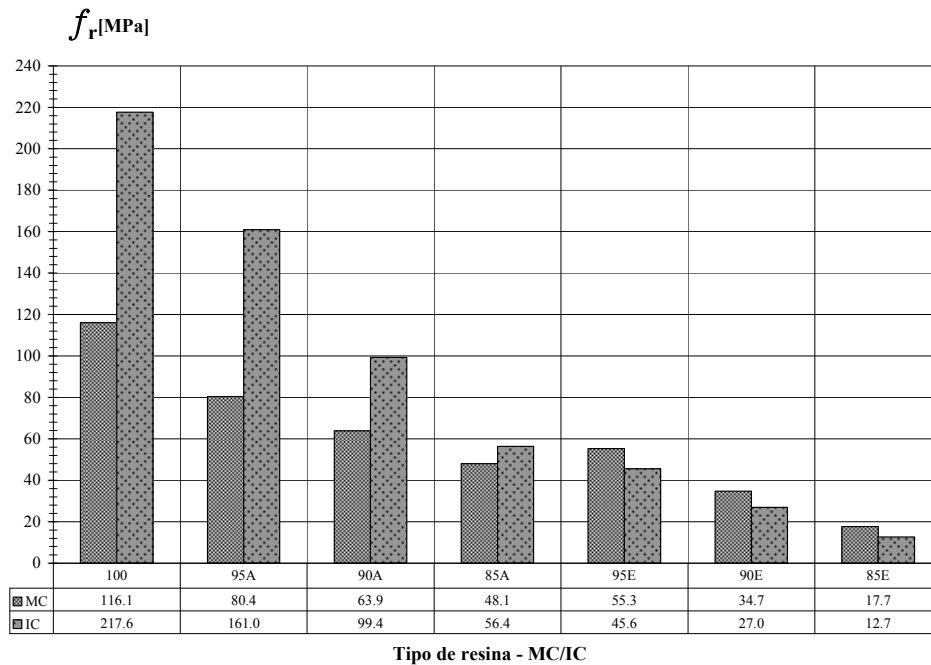


Fig.5.42- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à compressão das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).

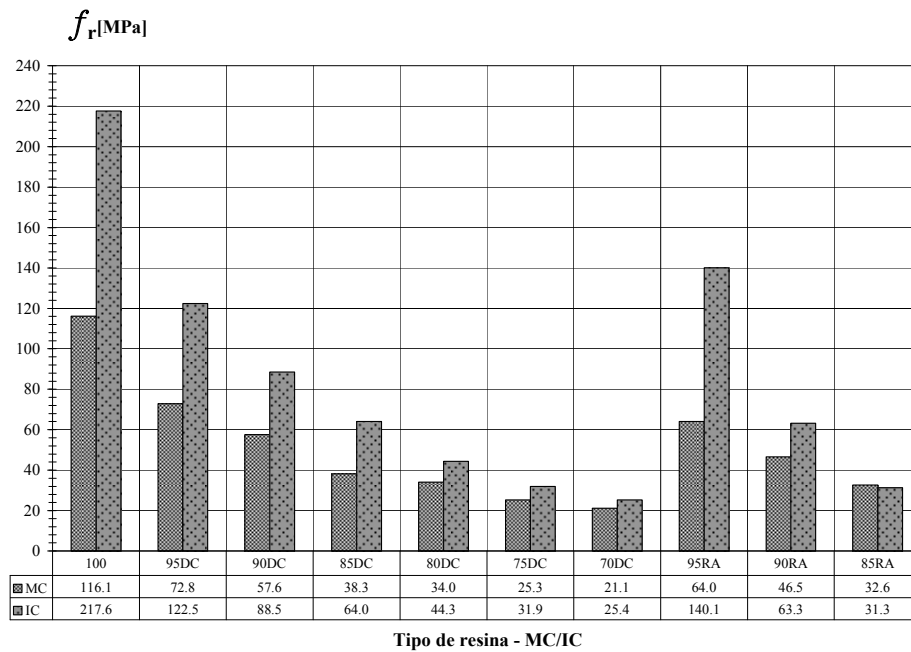


Fig.5.43- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na resistência à compressão das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).

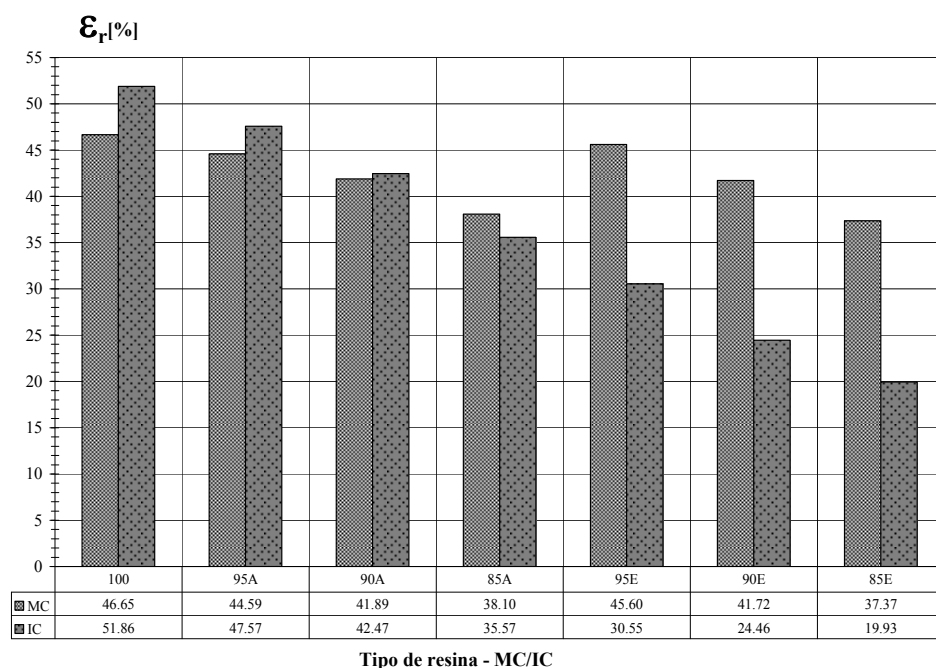


Fig.5.44- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura à compressão das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).

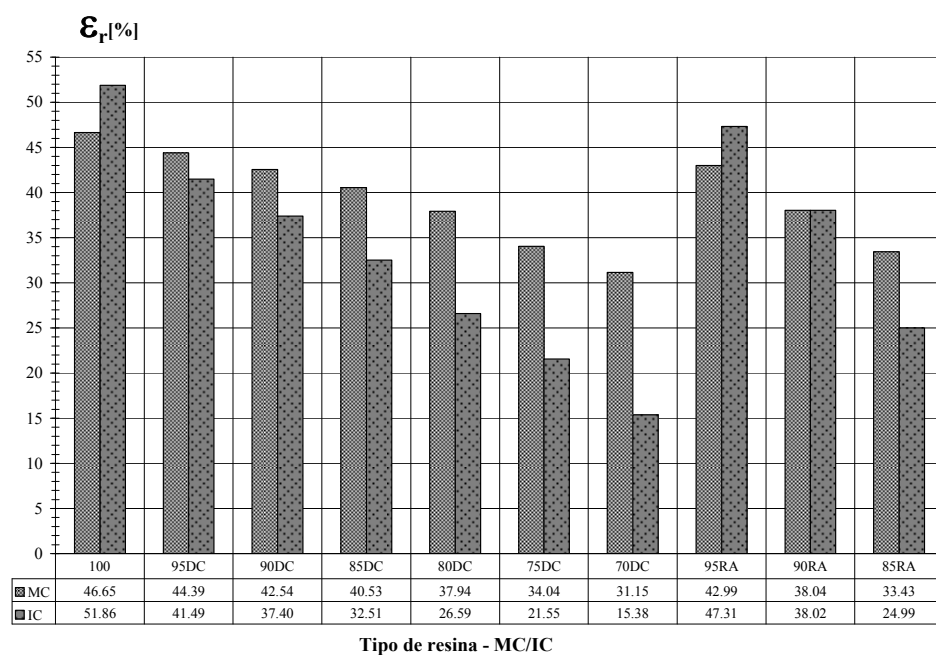


Fig.5.45- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) na extensão de rotura à compressão das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).

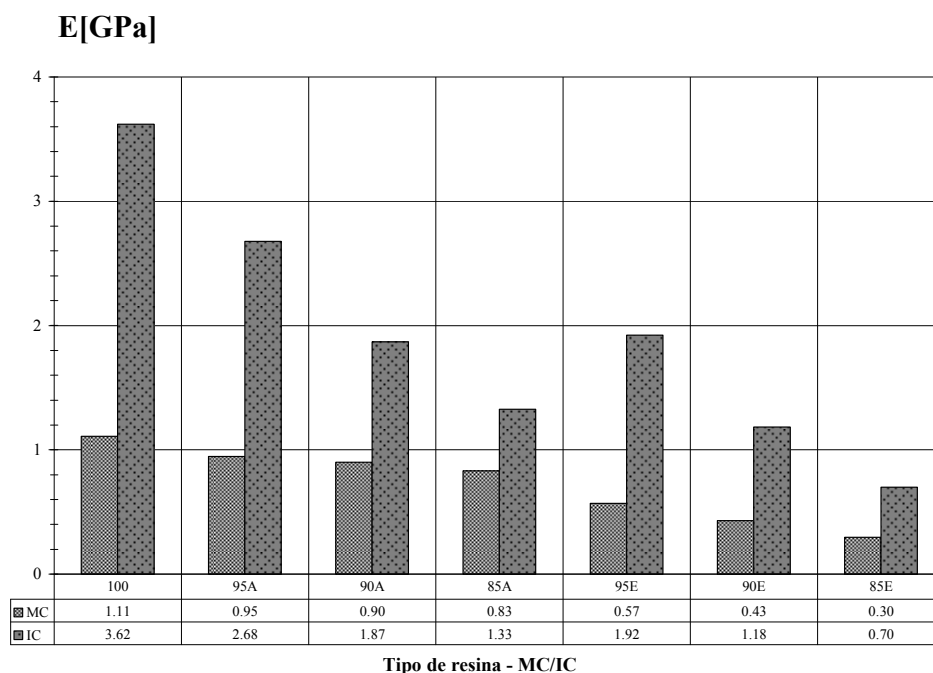


Fig.5.46- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de cortiça (A ou E).

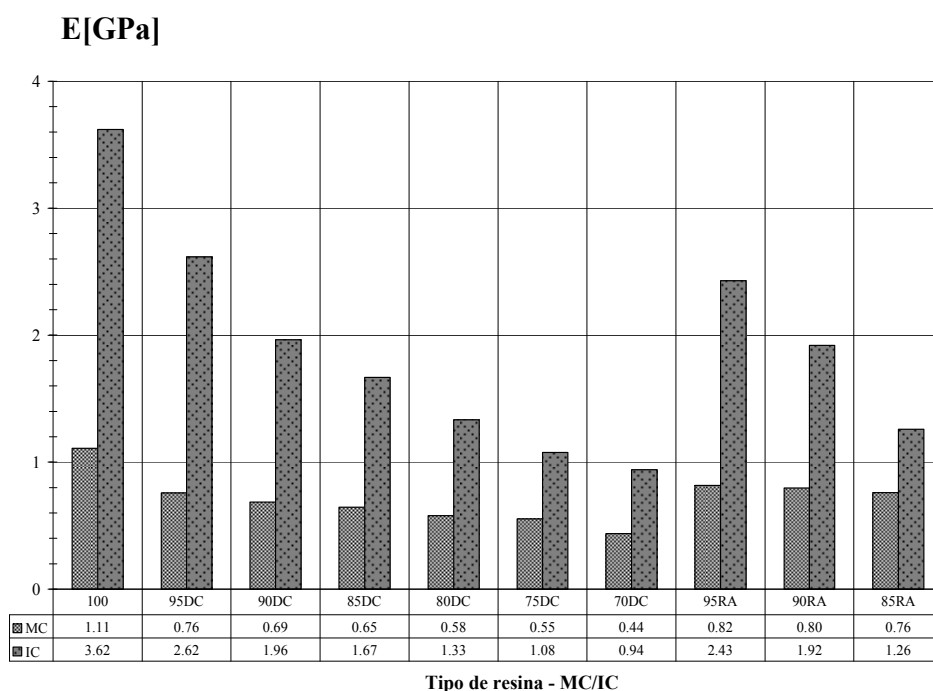


Fig.5.47- Efeito do tipo de resina (MC ou IC) no módulo de elasticidade das argamassas com os agregados de borracha (DC ou RA).

5.2.5.2 - EFEITO DOS AGREGADOS – COMPRESSÃO MONOTÓNICA

Nas Figuras 5.48 a 5.50 faz-se uma comparação dos parâmetros analisados nos diversos tipos de argamassas (resistência à compressão, extensão de rotura e módulo de elasticidade) em função dos diversos agregados e resinas utilizadas na mistura.

Em termos da resistência à compressão, verifica-se que as argamassas epoxídicas com agregados de maior granulometria (E e RA) apresentam menores valores de resistência comparativamente com as argamassas com agregados mais finos (A e DC), excepto no caso das argamassas IC95E,

Na generalidade, as argamassas poliméricas com o agregado A (pó de cortiça) nas suas composições apresentam valores superiores de tensão e de extensão de rotura comparativamente com as argamassas poliméricas dos outros agregados. Este caso só não se verifica no caso particular da argamassa com 85% de resina IC.

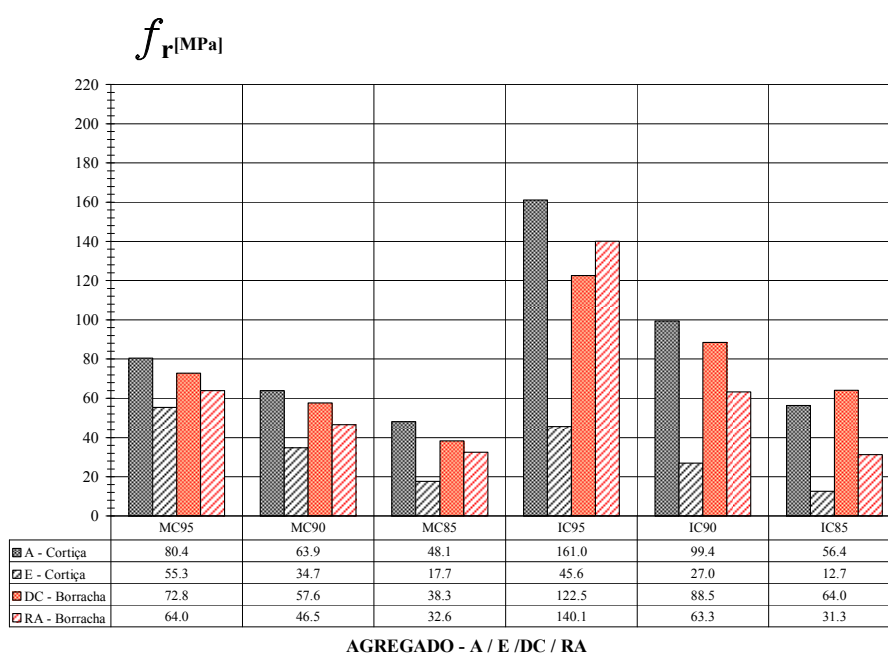


Fig.5.48- Efeito do tipo de agregado na resistência à compressão das argamassas com resinas MC ou IC.

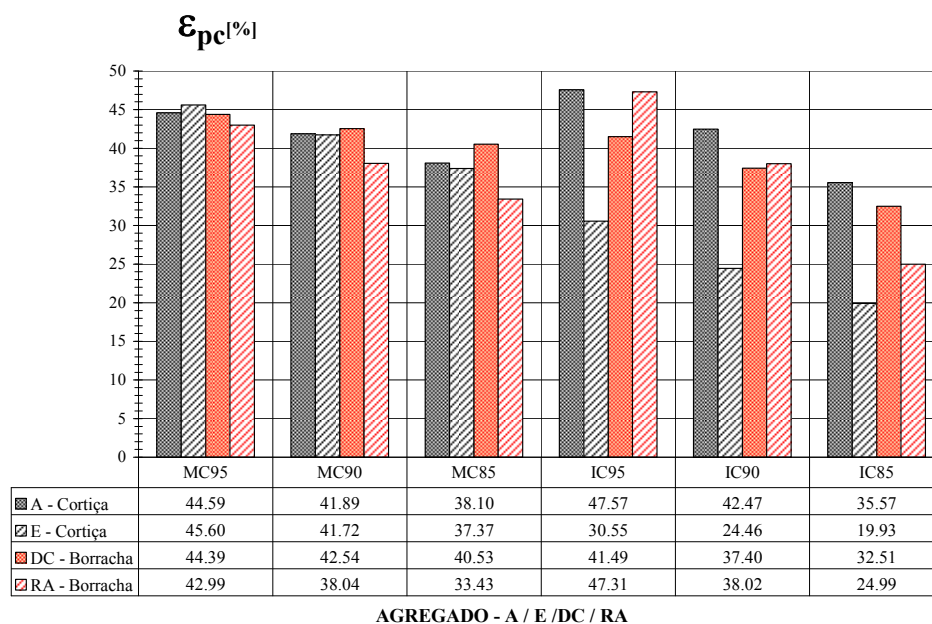


Fig.5.49- Efeito do tipo de agregado na extensão de rotura das argamassas com resinas MC ou IC.

Em termos de módulo de elasticidade, constata-se que as argamassas epoxídicas com agregados mais finos (A e DC), apresentam valores mais elevados comparativamente com as argamassas com agregados de maior granulometria (E e RA).

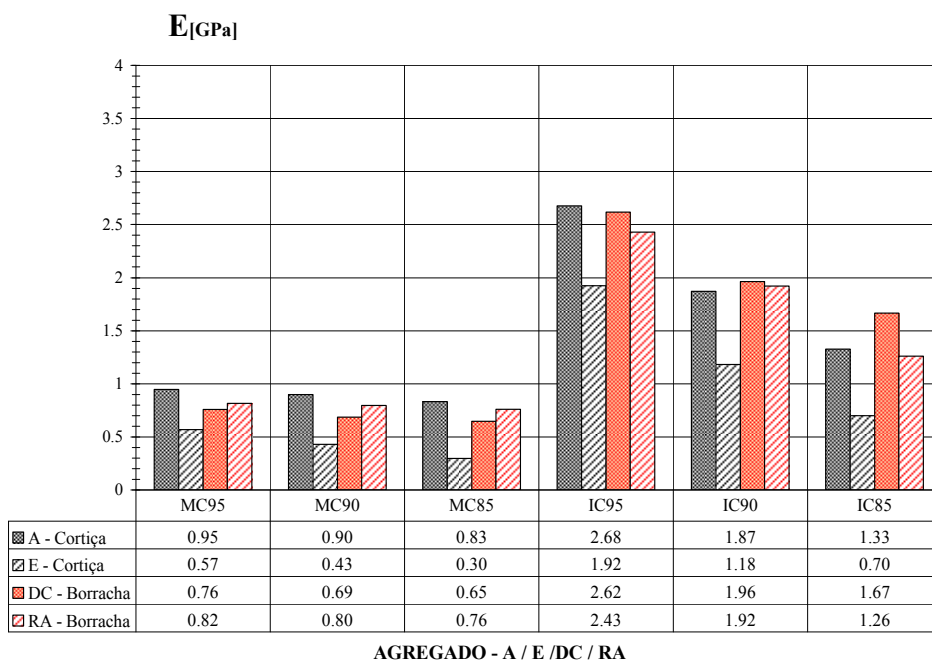


Fig.5.50- Efeito do tipo de agregado no módulo de elasticidade das argamassas com resinas MC ou IC.

Capítulo 6

6 - EFEITO DAS DIMENSÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS

Neste capítulo serão estudados os efeitos das dimensões dos provetes no comportamento mecânico das argamassas poliméricas, sujeitos a ensaios de compressão monotónica através de análise de diversos parâmetros, nomeadamente, a variação da altura, da secção transversal, do diâmetro e da forma, dos provetes.

Com o objectivo de estudar o efeito da escala no comportamento mecânico das argamassas poliméricas, produziram-se diversos tipos de argamassas com: dois tipos de resina epoxídica (MC e IC); dois tipos de agregados, um de cortiça (A) e outro de borracha (DC); três secções diferentes, duas circulares ($D=46\text{ mm}$, 98 mm) e uma quadrada ($40\times 40\text{ mm}^2$); e cinco alturas distintas, com as relações de proporção (H/D) de $1/5$, $1/2$, 1 , 2 e 4 .

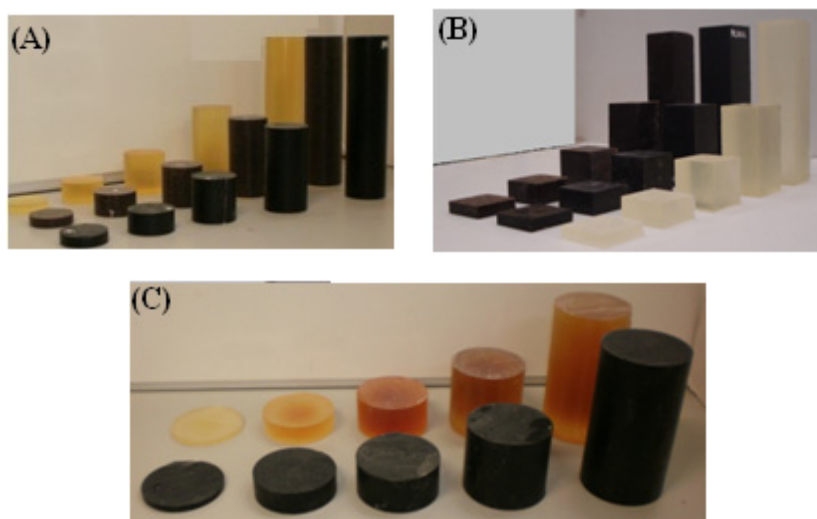


Fig.6.1- Provetes de argamassas poliméricas, com cinco alturas ($H/D=1/5$; $1/2$; 1 ; 2 e 4). Forma cilíndrica, $D=46\text{ mm}$ (A) e $D=98\text{ mm}$ (C); Forma prismática da secção (40×40) mm (B).

Apresentam-se, em seguida os resultados obtidos nos ensaios experimentais à compressão monotônica dos provetes de argamassas poliméricas cuja composição e geometria, foram apresentadas em detalhe nas Tabelas 3.2 e 3.3.

6.1 - EFEITOS DA VARIAÇÃO DAS ALTURAS - PROVETES CILÍNDRICOS (D=46 mm)

Para analisar avaliar o efeito da variação da altura foram produzidos diversos provetes de argamassas poliméricas com a forma cilíndrica e um diâmetro de 46 mm. A altura dos provetes, bem como a sua relação de proporção (H/D), encontra-se indicada na Tabela 6.1.

H [mm]	9.2	23	46	92	184
H/D	1/5	1/2	1	2	4

Tabela 6.1- Altura e relação de proporção (H/D) dos provetes.

Neste estudo foram analisadas quatro tipos de argamassas poliméricas:

- IC85A, IC70DC, MC85A e MC70DC;

Neste estudo foram analisadas, igualmente, os dois tipos de resina MC e IC que serviram de base à composição das argamassas poliméricas supracitadas.

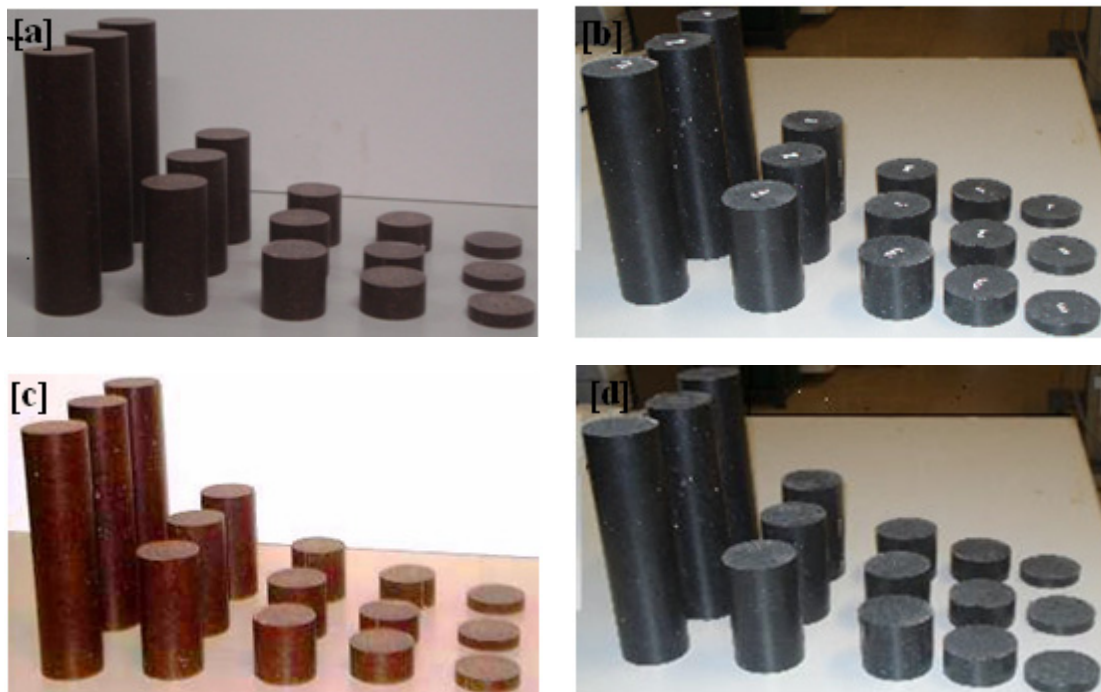


Fig.6.2- Provetes de argamassas poliméricas: IC85A [a], IC70DC [b], MC85A [c] e MC70DC [d].

Apresentam nas figuras seguintes os diagramas de tensão – extensão dos ensaios à compressão de cada provete de argamassa polimérica analisada. Seguido a cada diagrama é apresentada uma tabela com os respectivos resultados. Ainda serão apresentados para cada grupo de argamassas poliméricas, os diagramas de tensão, extensão e módulo de elasticidade em função da relação de proporção (H/D).

6.1.1 - RESINA IC

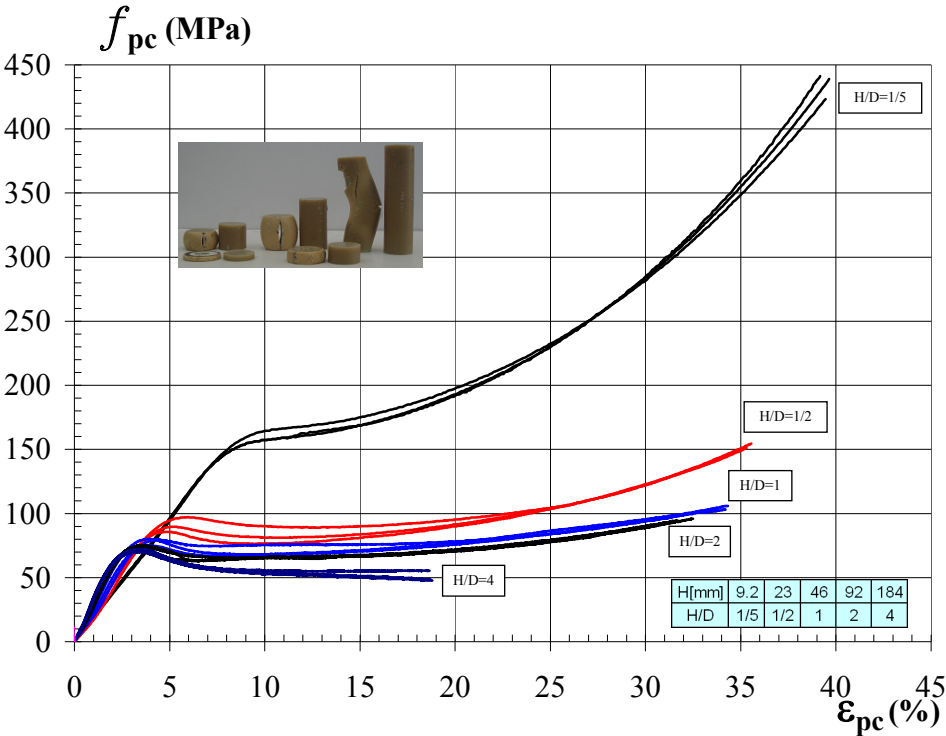


Fig.6.3- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes de resina IC, D=46 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\epsilon_{c,i}$ [%]	$\epsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\epsilon_{r,i}$ [%]	$\epsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC100 D=46 [mm]	9.2	1/5	161.6	154.6	9.35	8.8	423.3	434.5	39.45	39.4	423.3	434.5	1.98	1.96
			150.1		8.40		441.3		39.16		441.3		2.00	
			152.3		8.66		438.9		39.64		438.9		1.90	
	23	1/2	84.8	88.3	4.33	4.53	154.7	152.3	35.56	35.3	154.7	152.3	2.40	2.40
			87.8		4.55		151.0		35.30		151.0		2.50	
			92.3		4.71		151.3		35.12		151.3		2.30	
	46	1	78.3	76.1	3.41	3.5	106.0	104.3	34.33	34.1	106.0	104.3	2.90	2.80
			73.8		3.50		103.3		34.19		103.3		2.80	
			76.2		3.60		103.5		33.75		103.5		2.70	
	92	2	73.3	71.5	2.95	2.9	94.2	94.9	30.76	31.0	94.2	94.9	3.00	3.12
			69.1		2.81		94.6		30.70		94.6		3.15	
			72.2		2.96		95.9		31.50		95.9		3.20	
	184	4	68.0	68.8	2.70	2.7	47.7	50.6	19.20	18.9	71.7	71.3	3.30	3.40
			69.1		2.80		55.3		18.65		70.3		3.50	
			69.4		2.72		48.8		18.70		71.8		3.40	

Tabela 6.2- Resultados dos ensaios à compressão da resina IC.

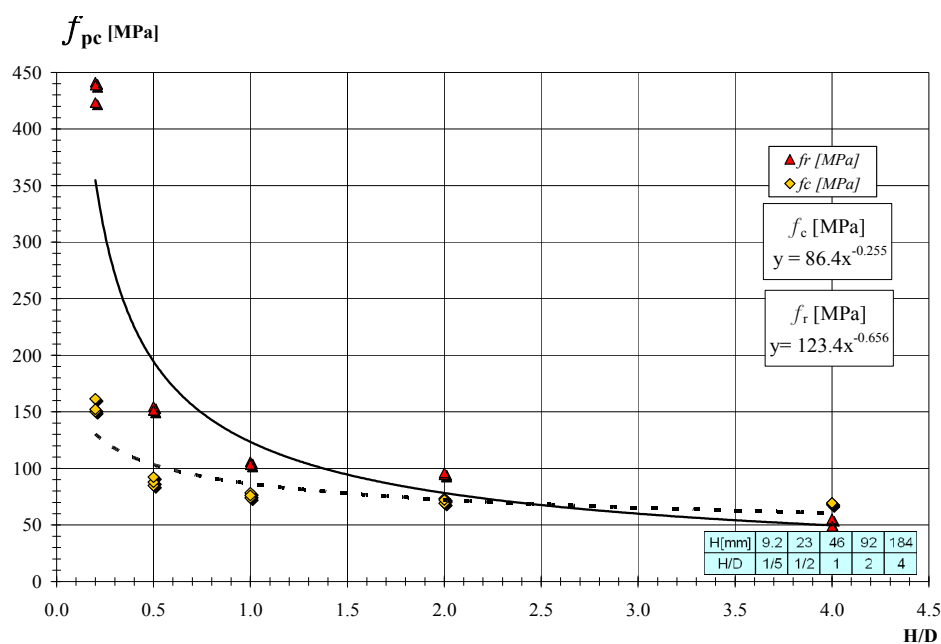


Fig.6.4- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – Provates de resina IC.

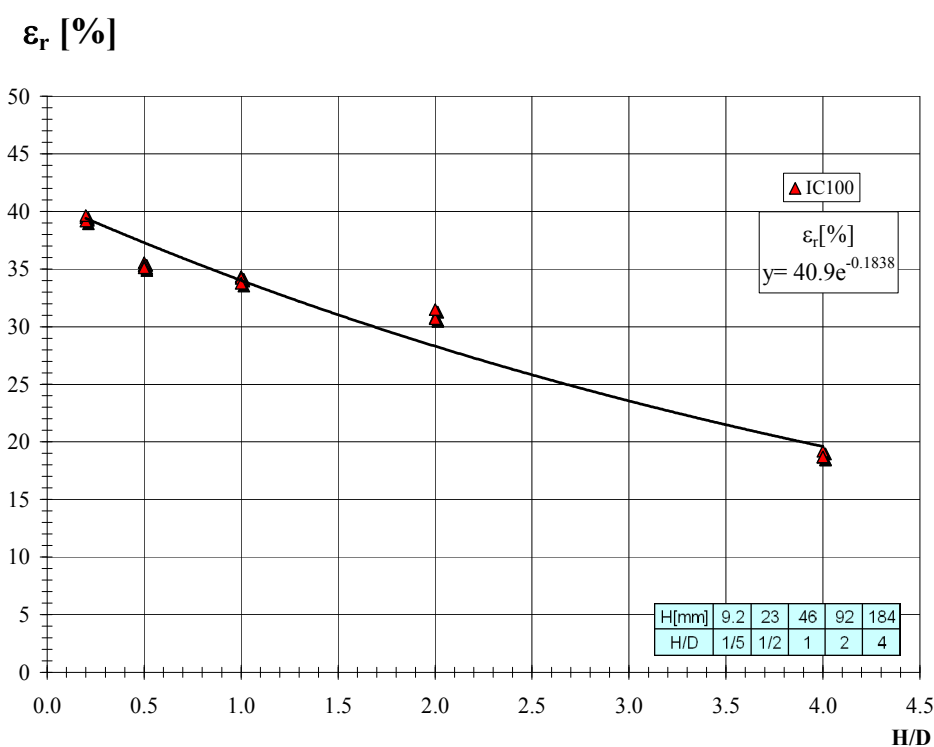


Fig.6.5- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – Provates de resina IC.

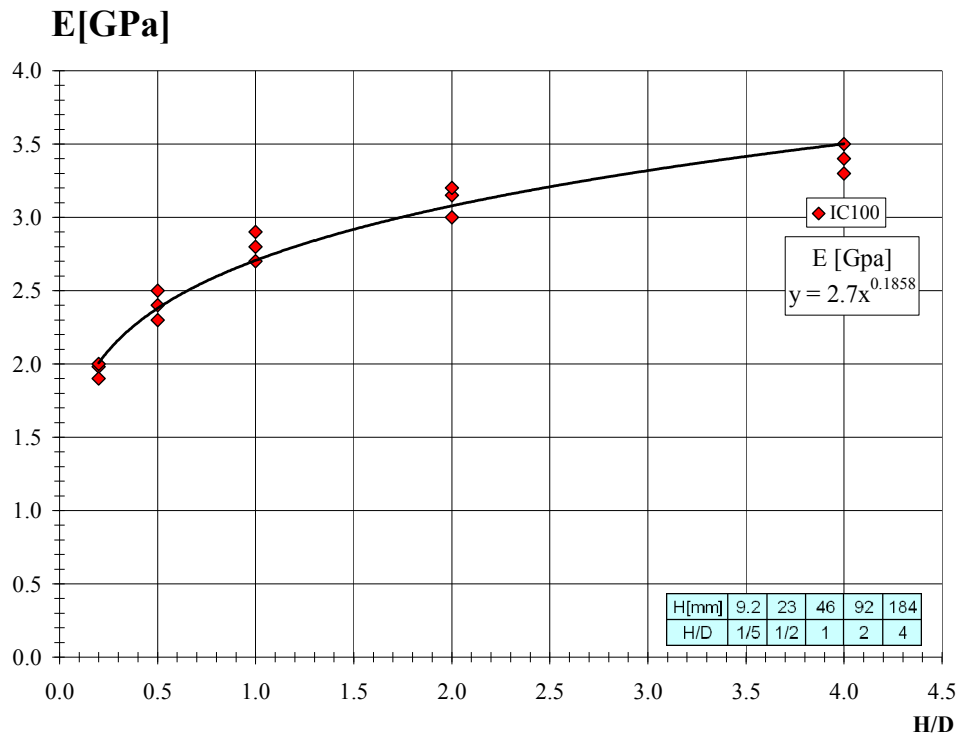


Fig.6.6- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – Provetes de resina IC.

6.1.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – IC85A

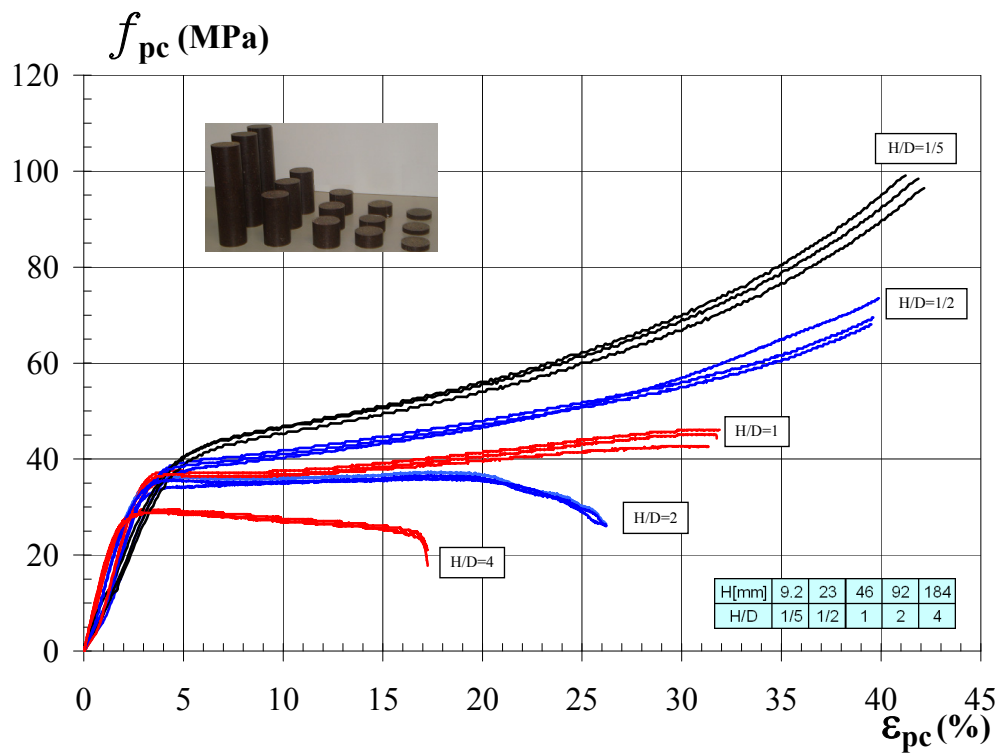


Fig.6.7- Diagramas tensão - extensão axial - Provetes IC85A, D=46 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{m\acute{a}x,i}$ [MPa]	$f_{m\acute{a}x,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC85A D=46 [mm]	9.2	1/5	39.7	40.5	5.26	5.2	96.5	98.0	42.06	41.4	96.5	98.0	0.94	0.94
			41.0		5.30		98.4		41.00		98.4		0.93	
			40.8		5.07		99.1		41.07		99.1		0.95	
	23	1/2	38.2	37.9	4.17	4.00	69.5	70.3	39.51	39.3	69.5	70.3	1.28	1.29
			37.7		3.82		73.0		38.78		73.0		1.30	
			37.9		4.00		68.4		39.53		68.4		1.29	
	46	1	36.2	35.9	3.36	3.4	46.0	44.2	31.95	31.5	46.0	44.2	1.50	1.50
			36.3		3.35		44.0		31.45		44.0		1.52	
			35.2		3.34		42.6		31.03		42.6		1.48	
	92	2	34.1	33.1	3.13	3.1	26.1	26.3	26.22	26.2	37.2	36.5	1.63	1.63
			31.2		3.10		26.0		26.20		36.2		1.61	
			34.0		3.05		26.7		26.15		36.0		1.64	
	184	4	28.5	28.9	2.34	2.4	17.1	17.5	21.60	19.6	29.4	29.6	1.66	1.70
			29.0		2.37		17.6		20.00		29.4		1.70	
			29.1		2.40		17.8		17.25		30.1		1.73	

Tabela 6.3- Resultados dos ensaios à compressão – IC85A.

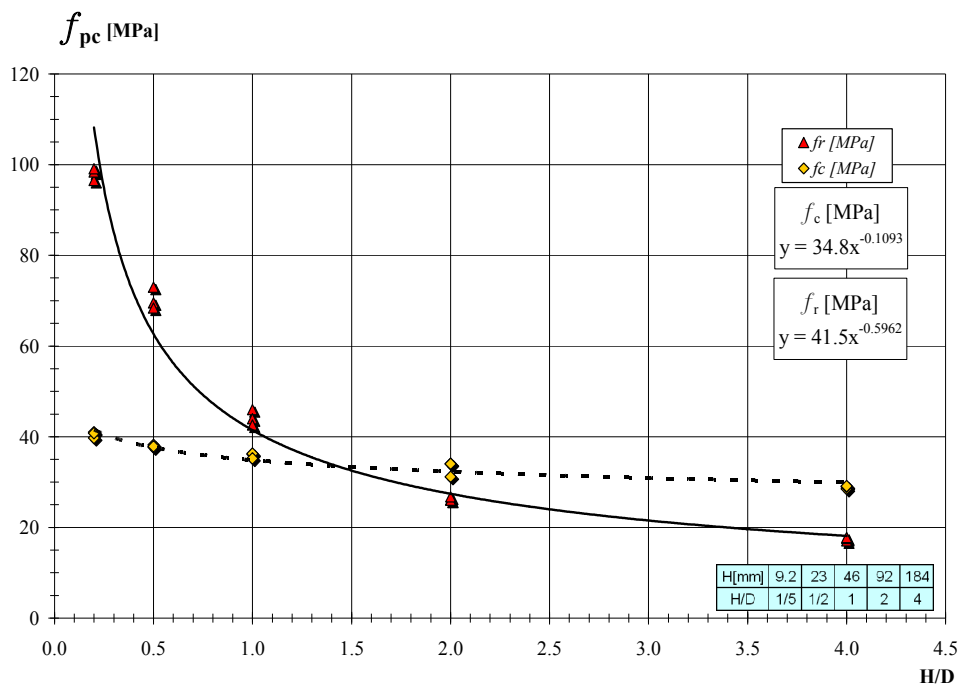


Fig.6.8- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – IC85A.

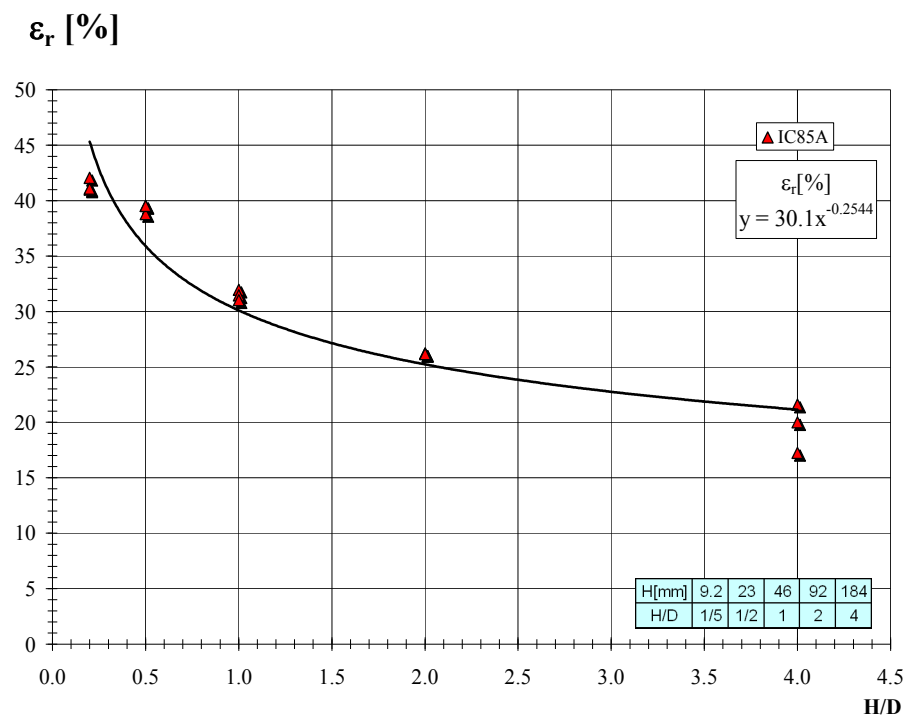


Fig.6.9- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – IC85A.

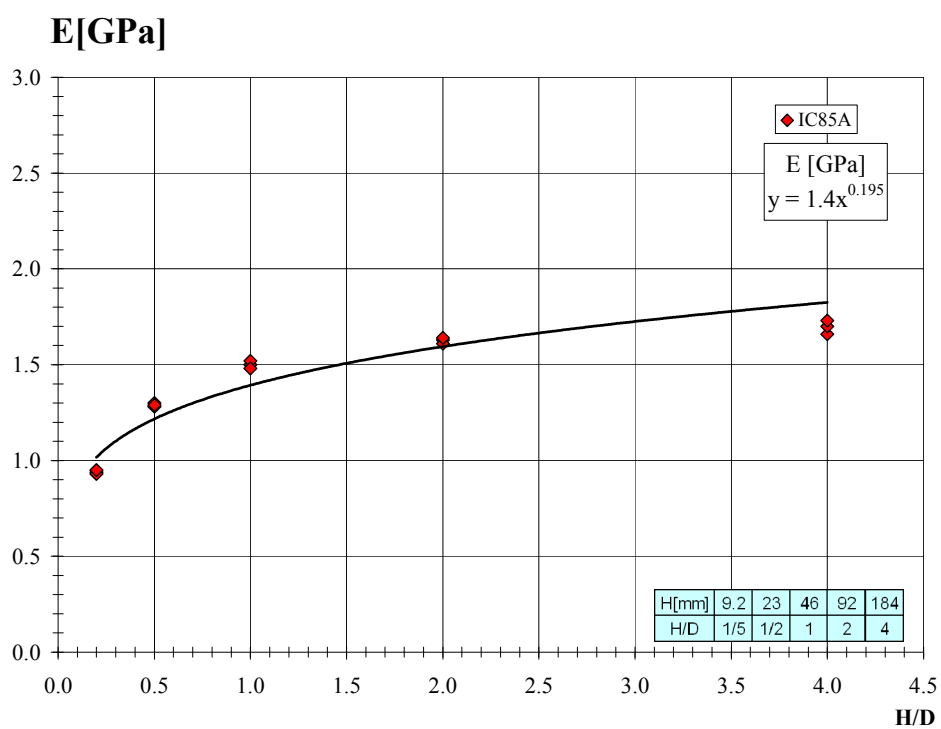


Fig.6.10- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – IC85A

6.1.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – IC70DC

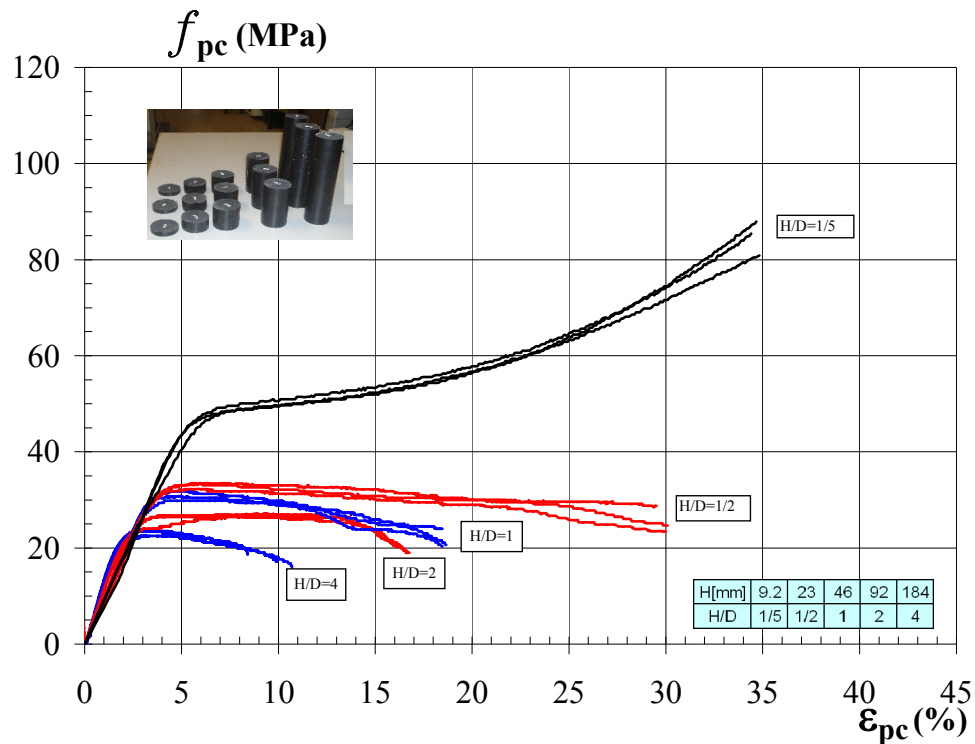


Fig.6.11- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes IC70DC, D=46 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
IC70DC D=46 [mm]	9.2	1/5	45.7	43.7	5.10	5.1	80.9	84.6	34.30	34.4	80.9	84.6	0.73	0.71
			42.3		5.20		87.5		34.47		87.5		0.71	
			43.2		5.00		85.4		34.40		85.4		0.70	
	23	1/2	31.2	30.5	3.90	3.95	24.7	25.6	30.08	30.0	33.5	33.1	0.78	0.79
			30.8		3.94		23.5		29.98		32.3		0.80	
			29.3		4.00		28.7		30.02		33.5		0.79	
	46	1	27.4	28.5	3.20	3.2	24.0	21.7	18.46	18.5	29.8	30.8	0.86	0.86
			29.5		3.36		20.3		18.47		30.9		0.83	
			28.6		3.15		20.7		18.67		31.7		0.90	
	92	2	24.7	24.3	2.80	2.8	15.5	19.1	19.14	18.0	27.3	27.0	0.95	0.98
			23.5		2.70		21.6		18.66		26.8		0.98	
			24.8		2.76		20.2		16.22		26.8		1.00	
	184	4	21.6	21.7	2.10	2.2	15.9	17.3	10.71	9.7	23.7	23.4	1.05	1.11
			21.1		2.20		17.3		9.92		22.5		1.14	
			22.4		2.15		18.6		8.42		23.8		1.14	

Tabela 6.4- Resultados dos ensaios à compressão - IC70DC.

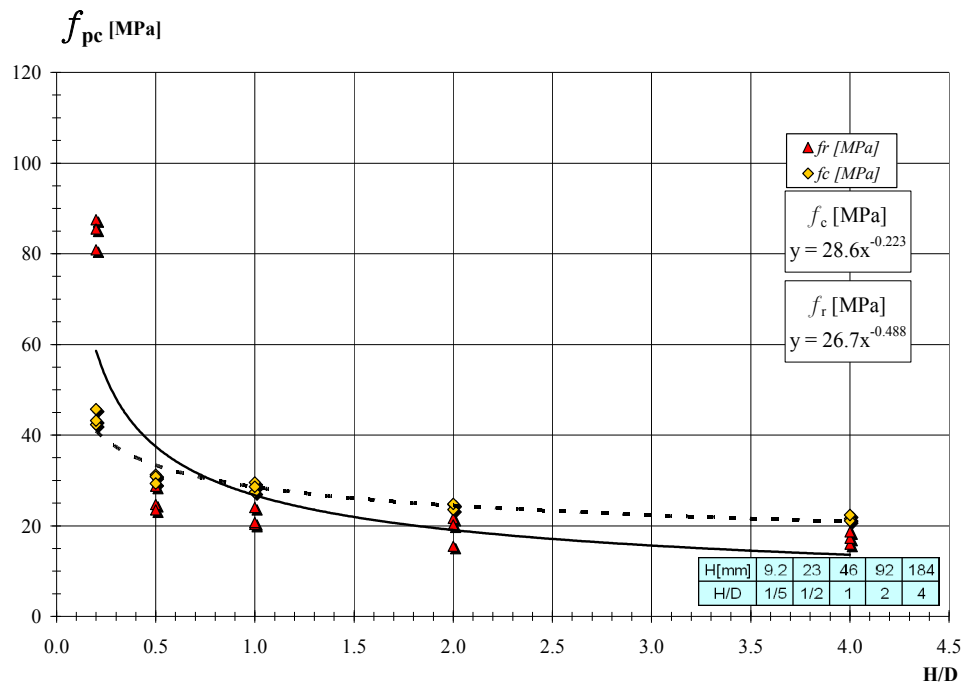


Fig.6.12- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) - IC70DC.

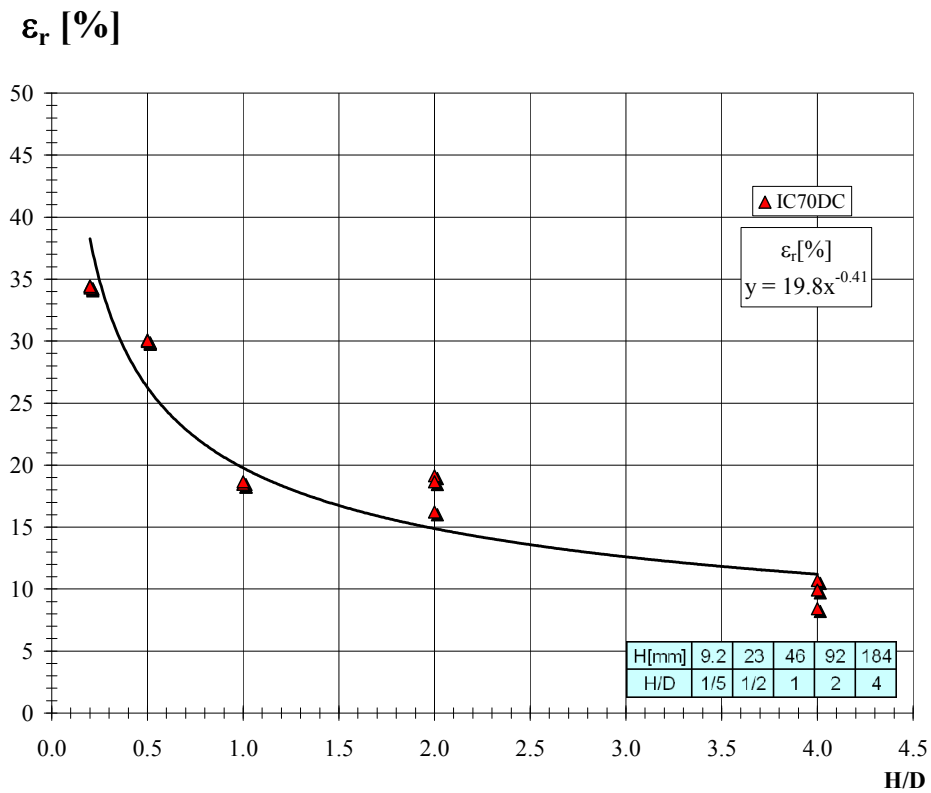


Fig.6.13- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) - IC70DC.

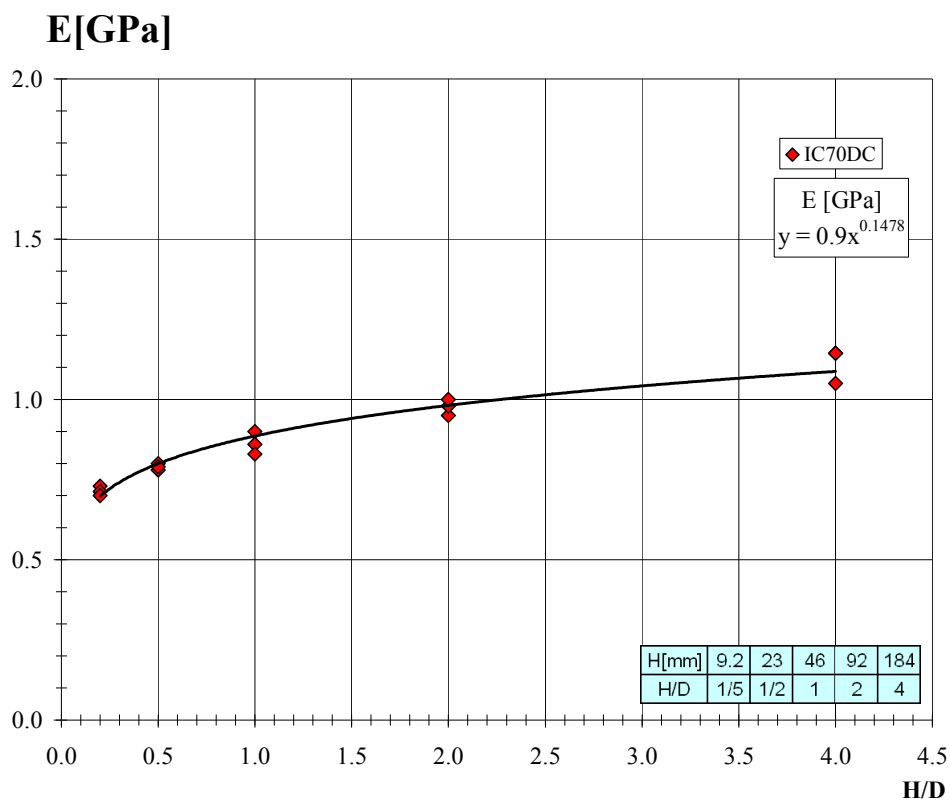


Fig.6.14- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) - IC70DC.

6.1.4 - RESINA MC

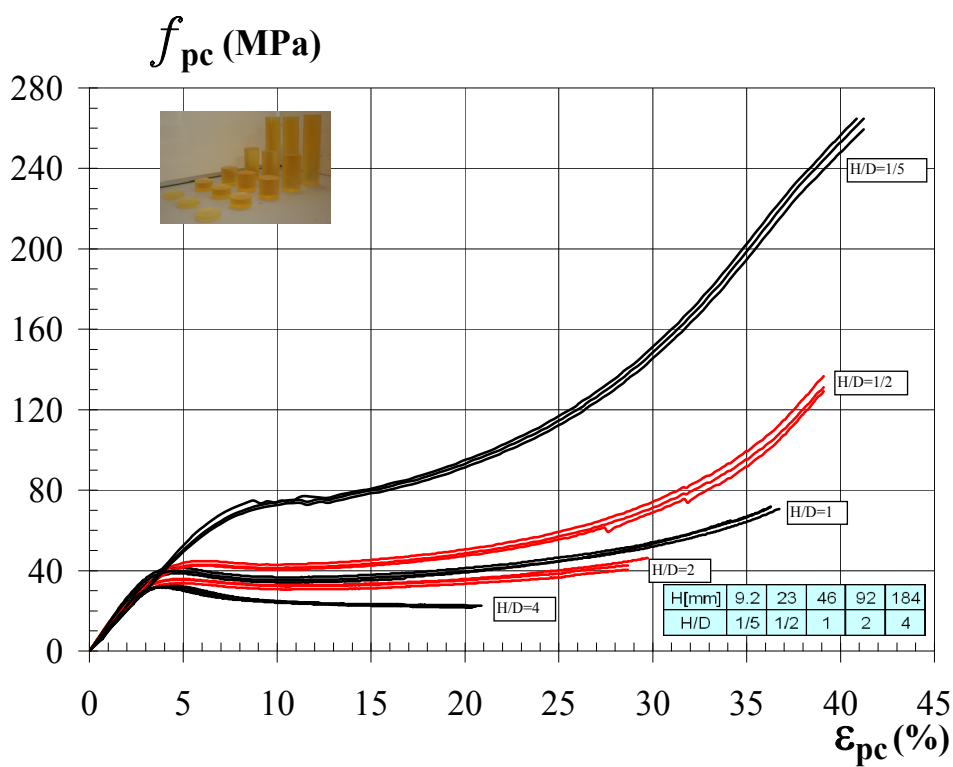


Fig.6.15- Diagramas tensão- extensão axial - Provete MC, D=46 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100 D=46 [mm]	9.2	1/5	71.1	70.7	8.93	8.6	264.7	263.0	41.24	41.1	264.7	263.0	0.90	0.91
			69.7		8.87		259.4		41.24		259.4		0.88	
			71.1		8.01		264.7		40.85		264.7		0.95	
	23	1/2	43.2	42.1	4.90	4.93	136.6	130.8	39.10	38.9	136.6	130.8	1.00	0.97
			42.0		5.00		129.6		38.94		129.6		0.98	
			41.0		4.90		126.2		38.79		126.2		0.93	
	46	1	37.5	38.7	3.88	3.8	71.2	71.2	36.28	36.4	71.6	71.4	1.00	1.07
			39.8		3.70		71.8		36.28		71.8		1.13	
			38.9		3.84		70.7		36.73		70.7		1.09	
	92	2	33.9	33.4	3.60	3.6	42.5	43.0	28.67	29.0	42.6	43.1	1.13	1.13
			33.6		3.55		46.2		29.73		46.2		1.20	
			32.6		3.70		40.4		28.67		40.4		1.07	
	184	4	30.9	31.0	3.40	3.4	22.6	22.2	20.87	20.6	32.7	32.5	1.18	1.19
			31.1		3.35		22.0		20.40		32.8		1.28	
			30.9		3.30		22.1		20.57		32.1		1.12	

Tabela 6.5- Resultados dos ensaios à compressão – MC100.

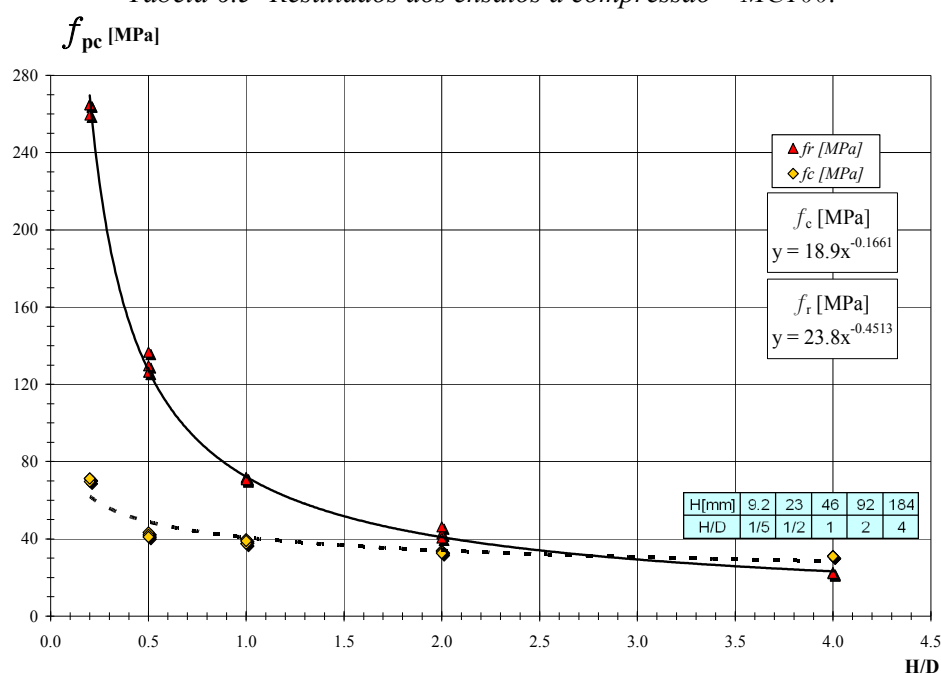


Fig.6.16- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) - MC100.

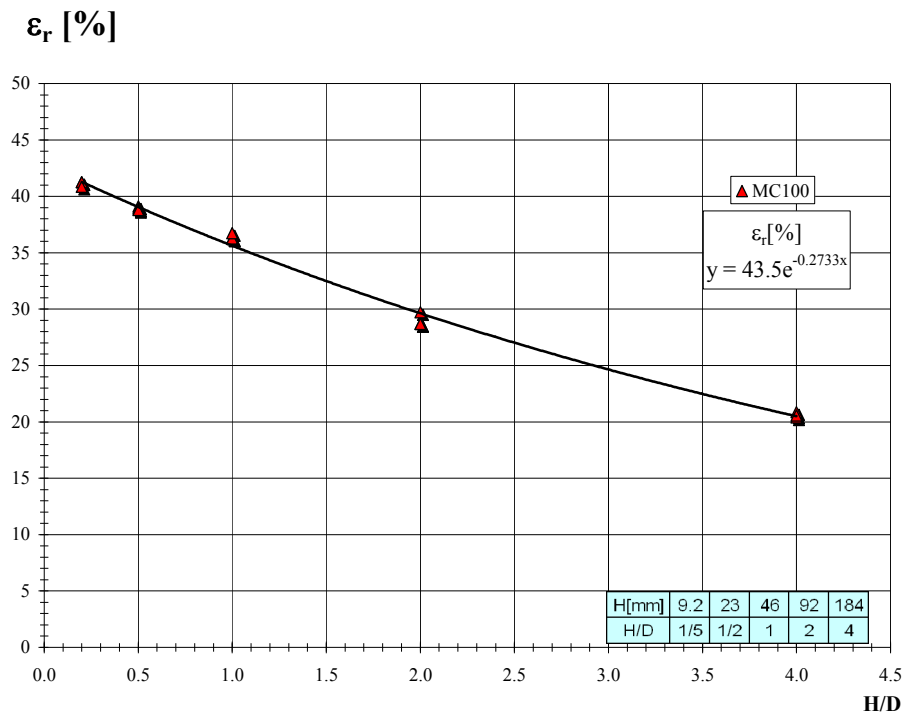


Fig.6.17- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) - MC100

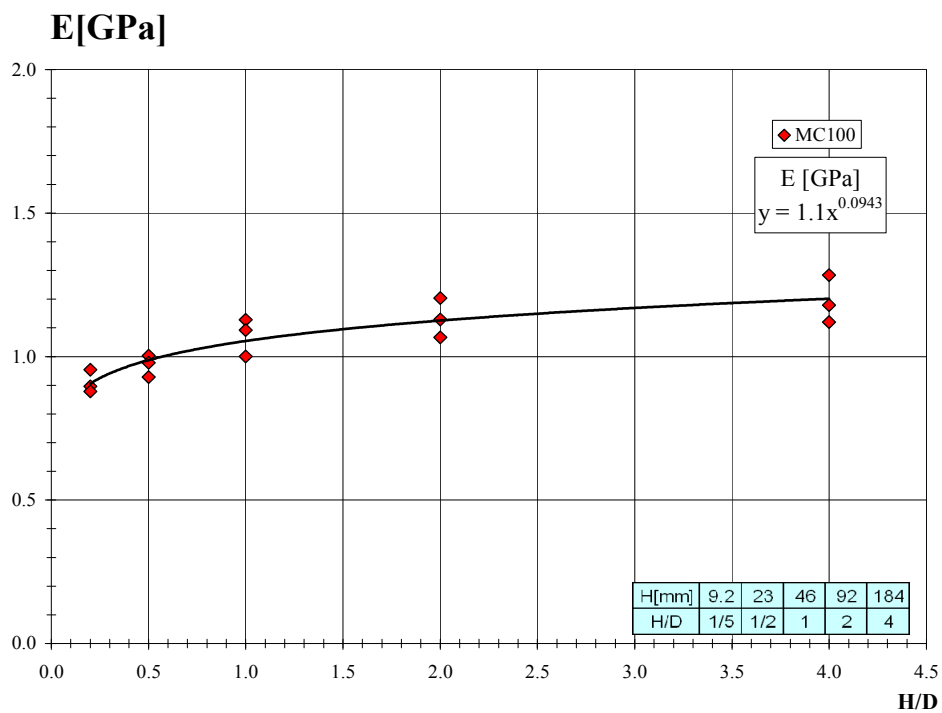


Fig.6.18- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) - MC100

6.1.5 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS - MC85A

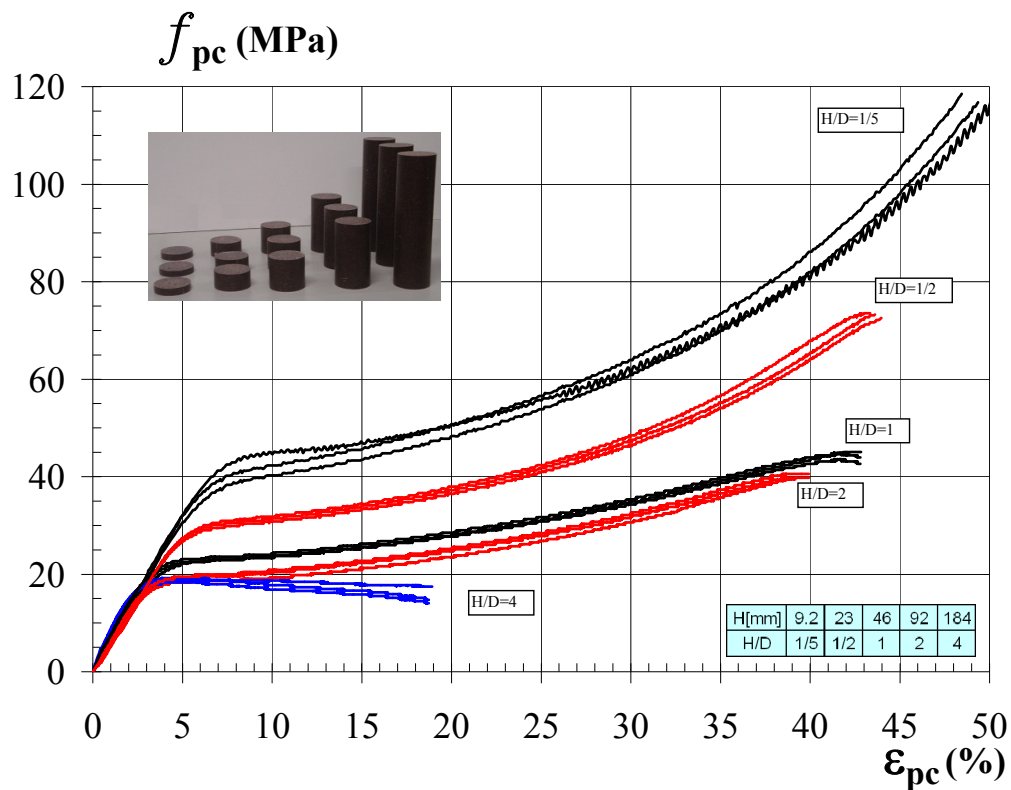


Fig.6.19- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC85A, D=46 mm.

Proвете	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC85A D=46 [mm]	9.2	1/5	38.4	38.9	7.80	7.7	116.3	116.7	49.37	49.0	116.8	117.0	0.55	0.58
			38.4		7.77		115.8		49.18		115.8		0.60	
			40.0		7.45		117.9		48.45		118.5		0.59	
	23	1/2	29.1	28.8	5.70	5.78	73.5	73.1	43.34	43.6	73.5	73.1	0.64	0.66
			29.1		5.90		73.1		43.61		73.3		0.67	
			28.1		5.73		72.5		43.96		72.5		0.67	
	46	1	21.6	21.4	4.26	4.3	42.7	43.5	42.80	42.8	43.6	44.1	0.66	0.67
			21.6		4.30		42.7		42.80		43.6		0.68	
			20.9		4.25		45.1		42.84		45.1		0.68	
	92	2	18.2	18.2	3.94	3.9	39.8	40.1	39.92	39.7	39.8	40.1	0.70	0.69
			17.9		3.95		39.8		39.19		39.8		0.69	
			18.6		3.90		40.6		39.92		40.6		0.67	
	184	4	18.0	18.4	3.45	3.4	14.0	15.4	18.74	18.8	18.3	18.7	0.71	0.71
			18.5		3.40		17.4		18.91		18.7		0.72	
			18.9		3.42		14.8		18.74		19.2		0.70	

Tabela 6.6- Resultados dos ensaios à compressão – MC85A.

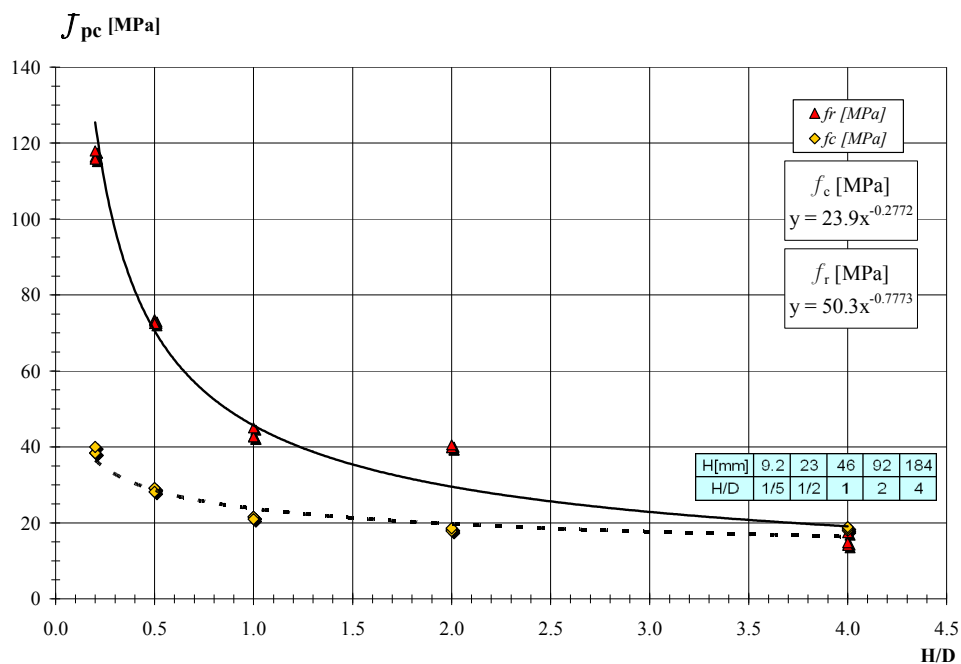


Fig.6.20- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC85A.

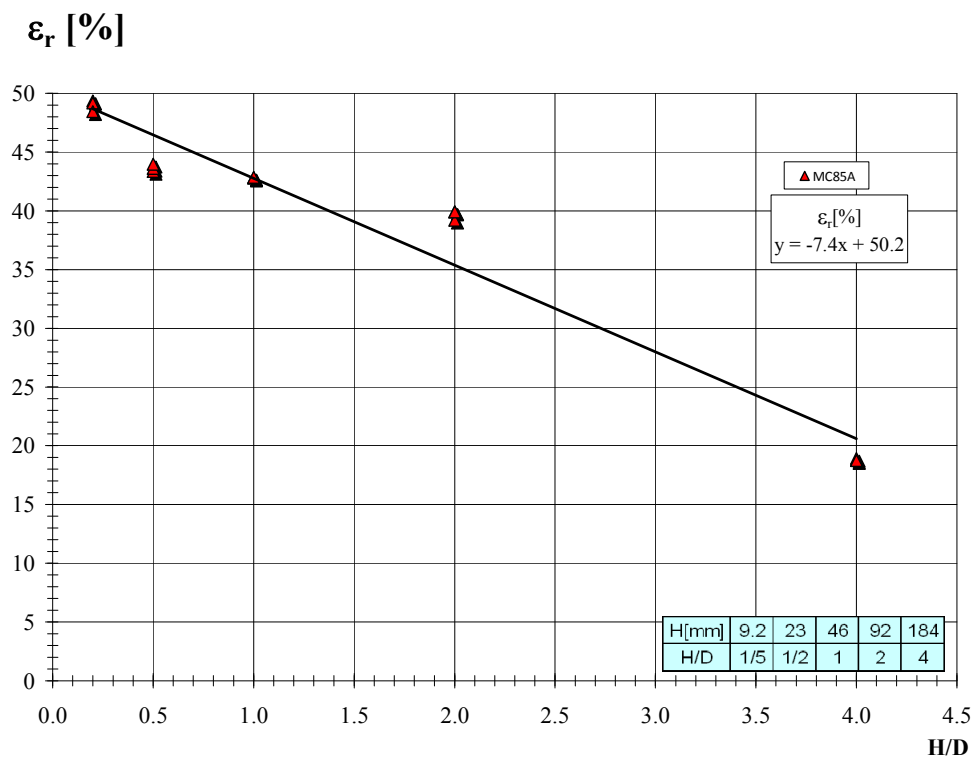


Fig.6.21- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC85A.

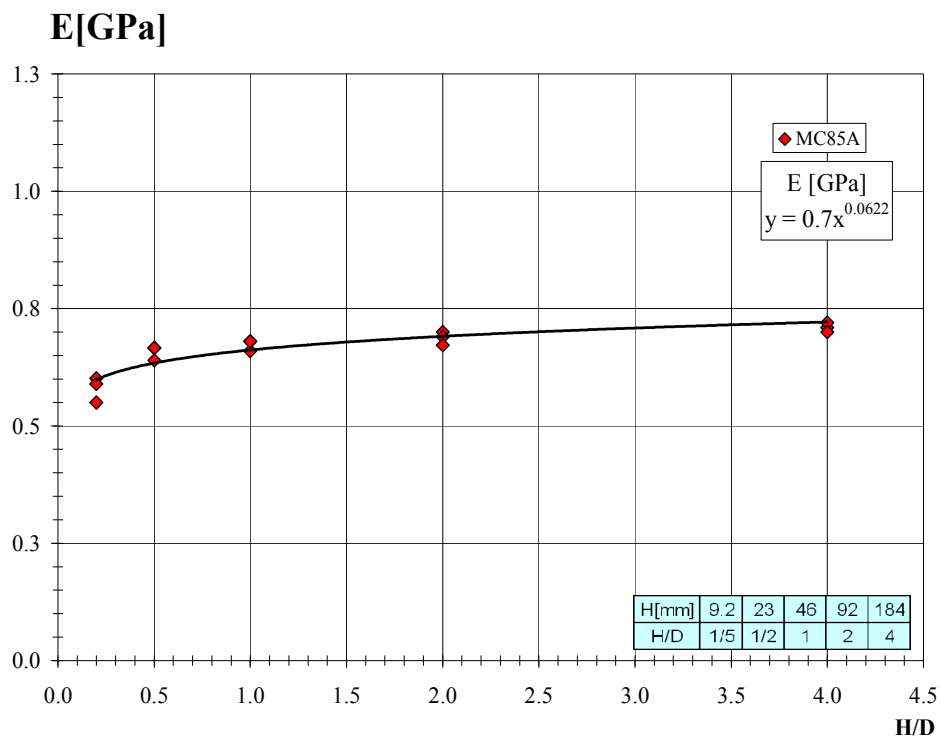


Fig.6.22- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC85A.

6.1.6 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC70DC

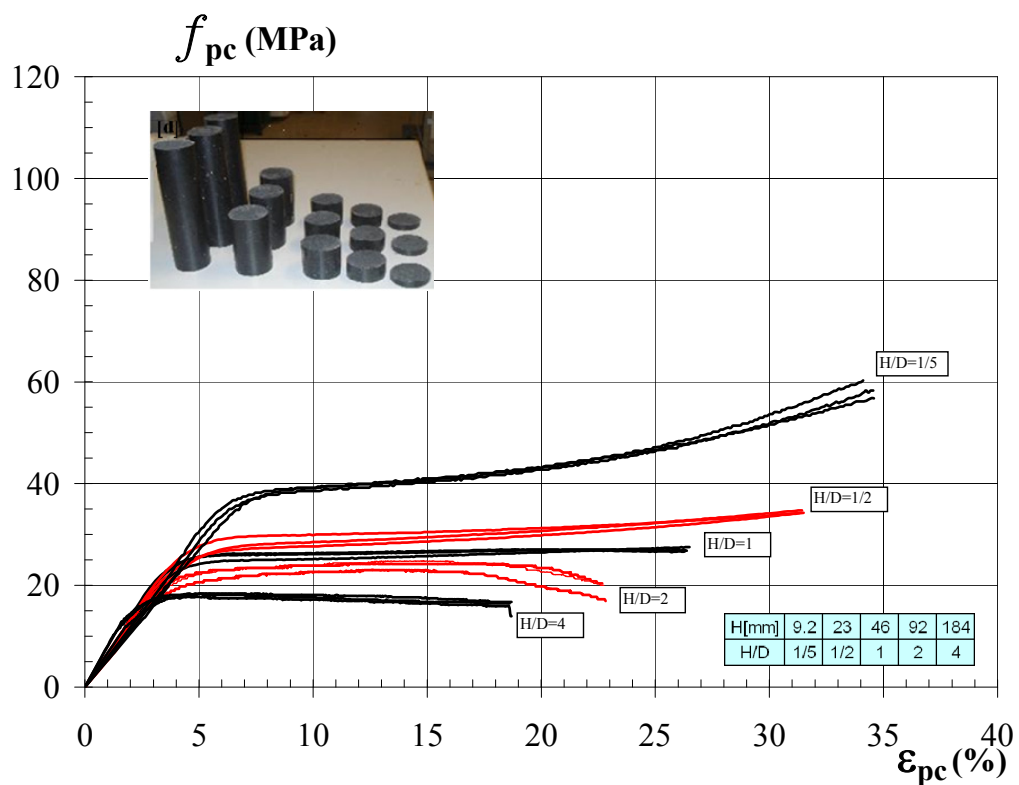


Fig.6.23- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC70DC, D=46 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{m\acute{a}x,i}$ [MPa]	$f_{m\acute{a}x,m}$ [MPa]	E _i [GPa]	E _m [GPa]
MC70D C D=46 [mm]	9.2	1/5	37.1	36.3	6.90	6.9	56.8	58.3	34.59	34.4	56.8	58.5	0.43	0.45
			35.7		6.94		60.0		34.01		60.3		0.45	
			36.1		6.90		58.3		34.55		58.3		0.47	
	23	1/2	27.4	26.1	5.00	5.05	34.2	34.4	31.31	31.4	34.2	34.4	0.56	0.51
			25.5		5.10		34.2		31.51		34.3		0.50	
			25.4		5.05		34.8		31.43		34.8		0.48	
	46	1	25.3	24.9	4.77	4.8	26.8	27.0	26.38	26.4	27.1	27.2	0.60	0.58
			23.9		4.80		27.6		26.49		27.6		0.58	
			25.4		4.81		26.7		26.29		26.9		0.56	
	92	2	19.0	20.1	3.91	3.9	17.0	19.1	22.82	22.7	23.1	24.1	0.64	0.65
			20.4		3.95		20.0		22.75		24.8		0.65	
			20.9		3.90		20.4		22.67		24.3		0.66	
	184	4	16.7	16.5	2.81	2.9	14.0	15.7	18.70	18.7	17.7	18.2	0.65	0.66
			16.7		2.80		16.5		18.60		18.4		0.66	
			16.1		3.00		16.7		18.69		18.4		0.67	

Tabela 6.7- Resultados dos ensaios à compressão – MC70DC.

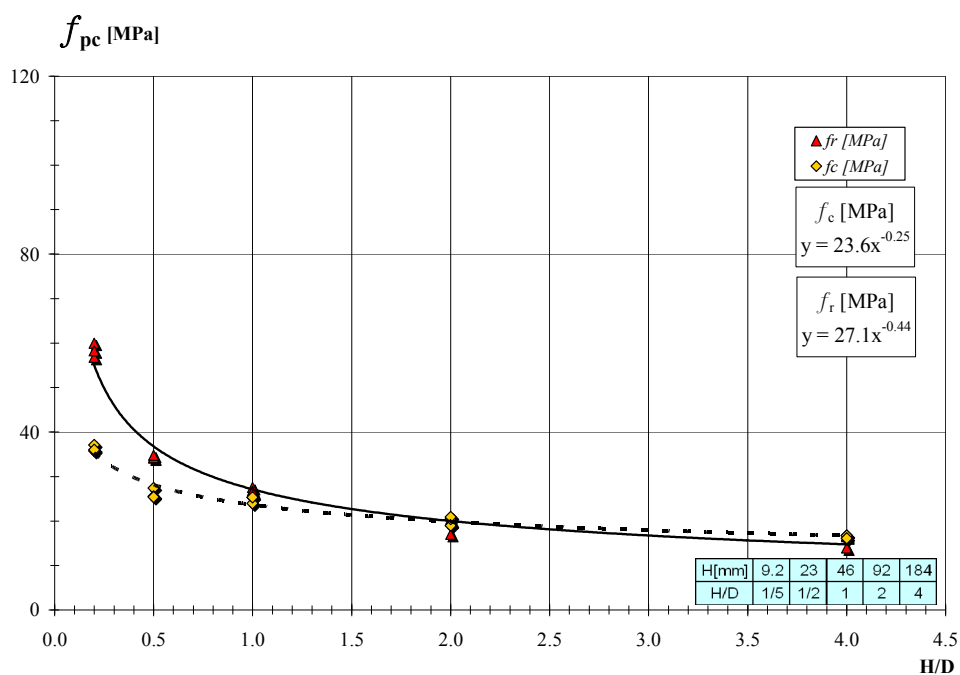


Fig.6.24- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC70DC.

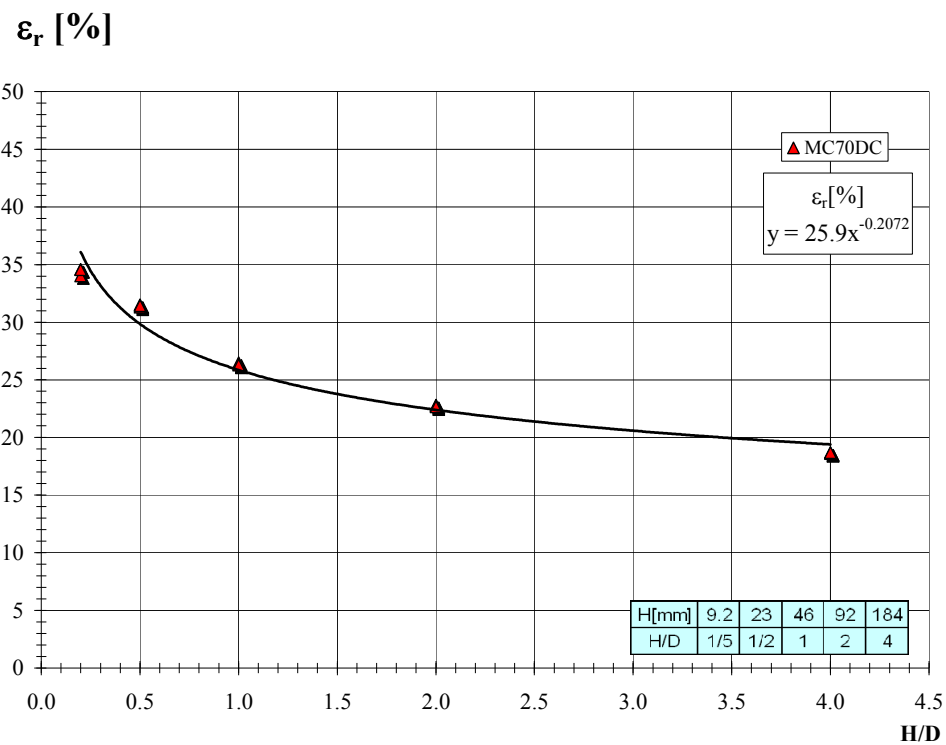


Fig.6.25- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC70DC.

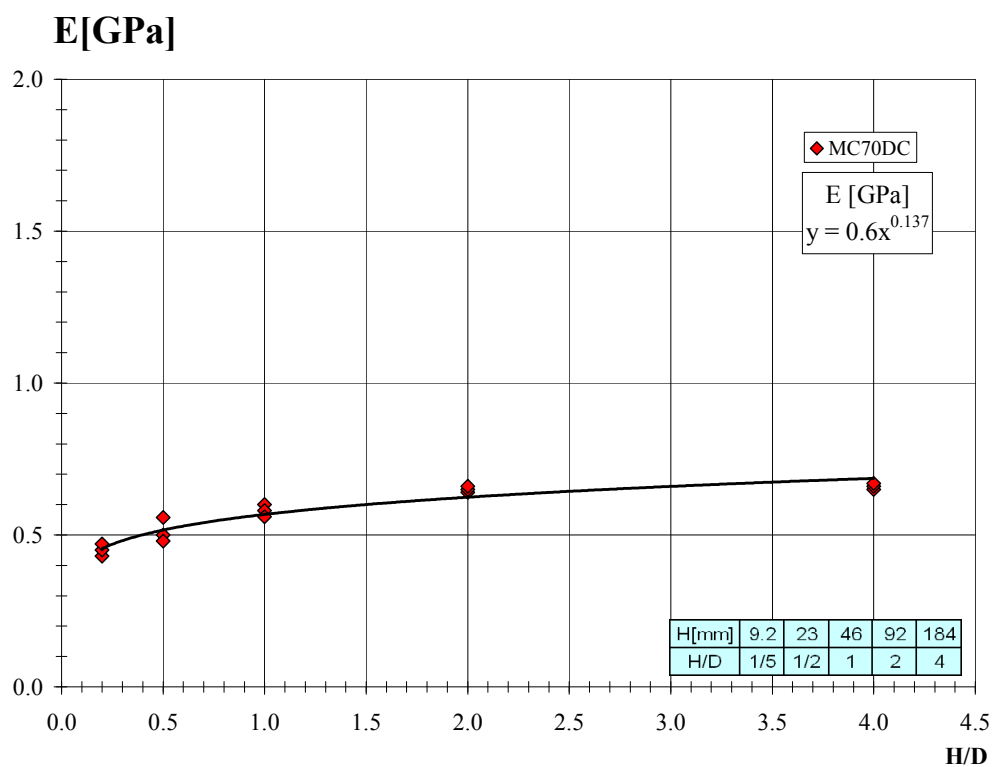


Fig.6.26- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC70DC.

6.1.7 - ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos diagramas tensão-extensão e dos gráficos da tensão de rotura, de cedência, extensão de rotura e módulo de elasticidade em função da relação de proporção (H/D), acima apresentados, e dos resultados apresentados nas Tabelas 6.2 a 6.7, permite retirar as seguintes conclusões:

- ❖ As tensões e as extensões diminuem à medida que aumenta a altura dos provetes. Contudo, é de realçar o facto dos provetes de argamassas poliméricas perderem em resistência mas ganharem em rigidez;
- ❖ Em todos os tipos de argamassas poliméricas, constata-se que para os provetes com $H/D > 2$ a tensão de rotura é inferior à tensão de cedência.

6.2 - EFEITO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS PROVETES

Nesta série foram ensaiados à compressão monotônica, provetes de argamassas poliméricas e provetes de resina, de secção circular, com as mesmas alturas dos provetes analisados no subcapítulo 6.1 e o dobro do diâmetro. A composição e geometria desses provetes, foram apresentados na Tabela 3.3.

Nesta fase do estudo, foram analisadas provetes de MC70DC e MC100. Apresenta-se na Tabela 6.8, as alturas e o diâmetro dos provetes analisados.

H [mm]	9.2	23	46	92	184
D [mm]	98				

Tabela 6.8- Geometria dos provetes.

Apresentam-se, em seguida os resultados obtidos dos ensaios à compressão monotônica. Primeiramente são apresentados cada grupo separadamente e posteriormente serão analisados os efeitos da variação do diâmetro, fazendo uma comparação com provetes do mesmo tipo, com relações de proporção semelhantes, porém com metade do diâmetro.

6.2.1 - RESINA MC

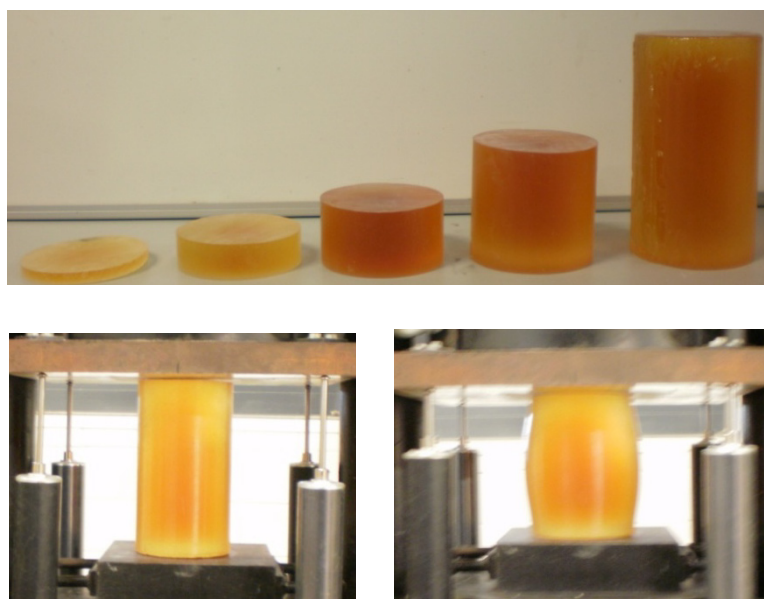


Fig.6.27- Provetes de resina MC, D=98 mm. Pormenores do ensaio à compressão monotônica.

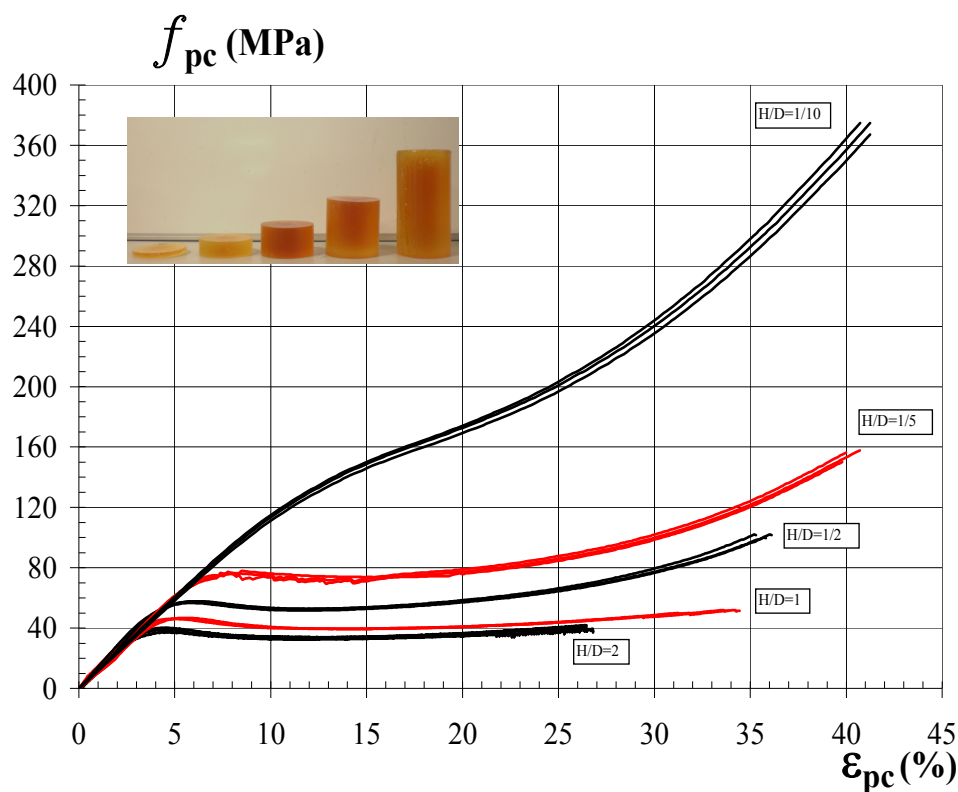


Fig.6.28- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC100, D=98 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100 D=98 [mm]	9.2	1/10	149.5	147.8	15.00	15.1	371.1	371.0	40.72	41.1	374.8	372.3	1.05	1.03
			147.4		15.10		374.8		41.25		374.8		1.04	
			146.5		15.20		367.2		41.25		367.2		1.02	
	23	1/5	68.3	69.1	6.00	6.02	157.9	154.4	40.72	40.2	157.9	154.8	1.15	1.12
			70.8		6.10		155.3		39.99		156.3		1.10	
			68.0		5.95		150.1		39.79		150.1		1.13	
	46	1/2	51.3	50.9	4.20	4.2	101.6	101.0	35.29	35.7	102.1	101.5	1.19	1.18
			51.5		4.15		99.6		35.81		100.1		1.21	
			50.0		4.10		101.6		36.11		102.1		1.16	
	92	1	38.5	36.9	3.00	3.1	51.5	50.8	33.86	33.6	52.0	51.2	1.30	1.26
			37.3		3.10		51.5		34.45		52.0		1.28	
			35.0		3.15		49.4		32.40		49.5		1.20	
	184	2	30.9	30.3	2.50	2.5	39.6	40.7	26.80	26.6	39.6	40.8	1.26	1.28
			28.7		2.45		41.8		26.46		42.0		1.27	
			31.2		2.48		40.6		26.47		40.6		1.31	

Tabela 6.9- Resultados dos ensaios à compressão – MC100, D=98 mm.

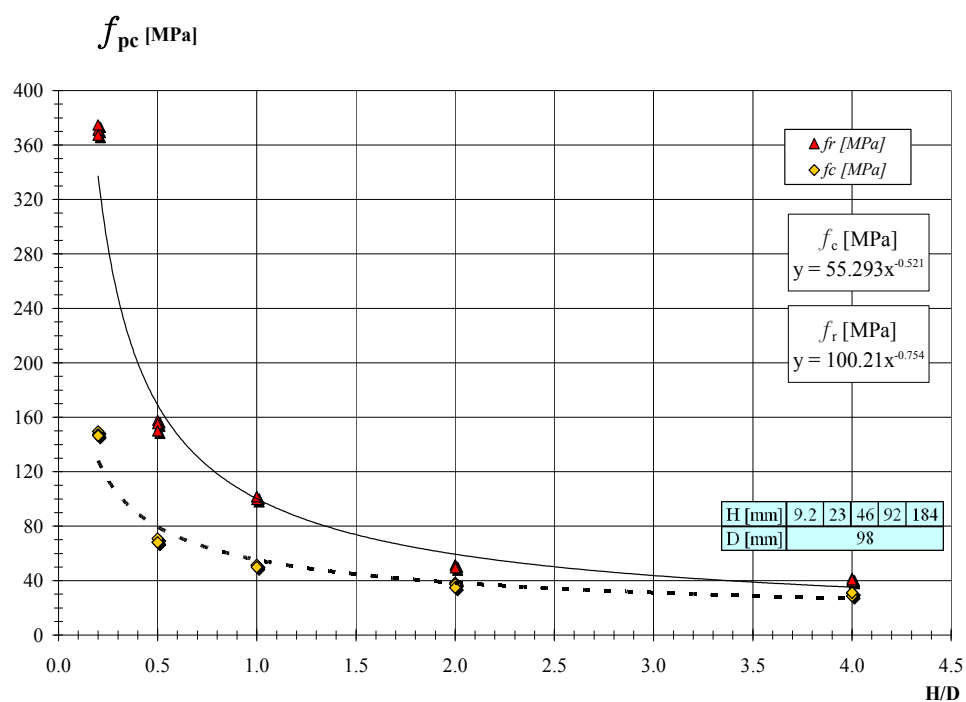


Fig.6.29- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC100, D=98 mm..

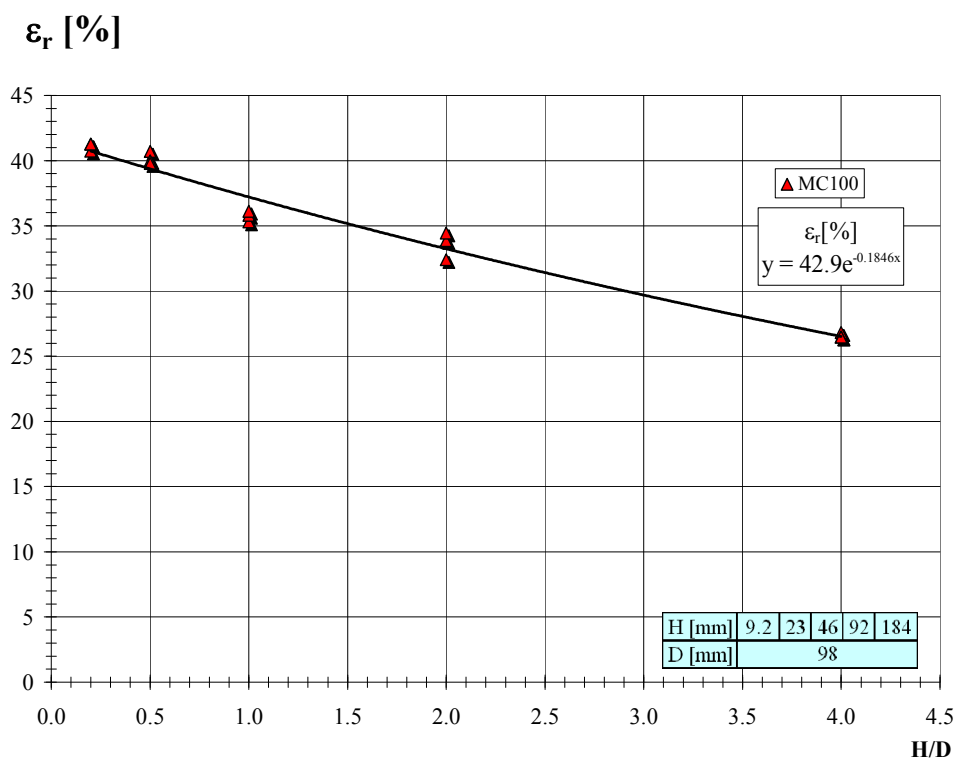


Fig.6.30- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC100, D=98 mm.

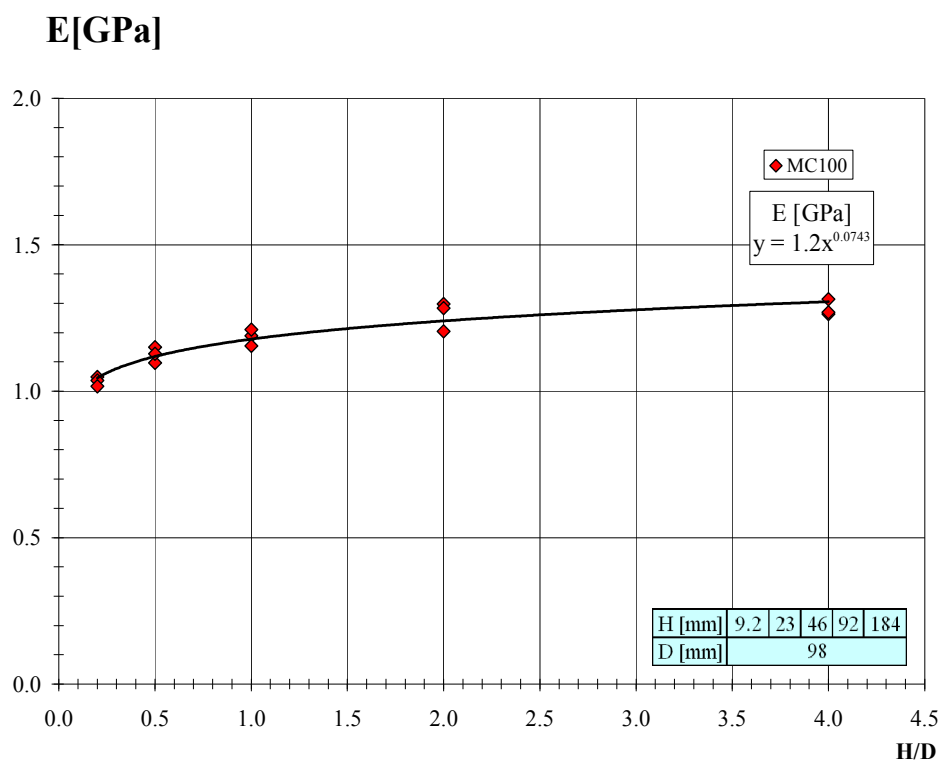


Fig.6.31- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC100, D=98 mm.

6.2.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC70DC (D=98 mm)



Fig.6.32 - Provetes MC70DC, D=98 mm. Pormenores do ensaio à compressão monotónica.

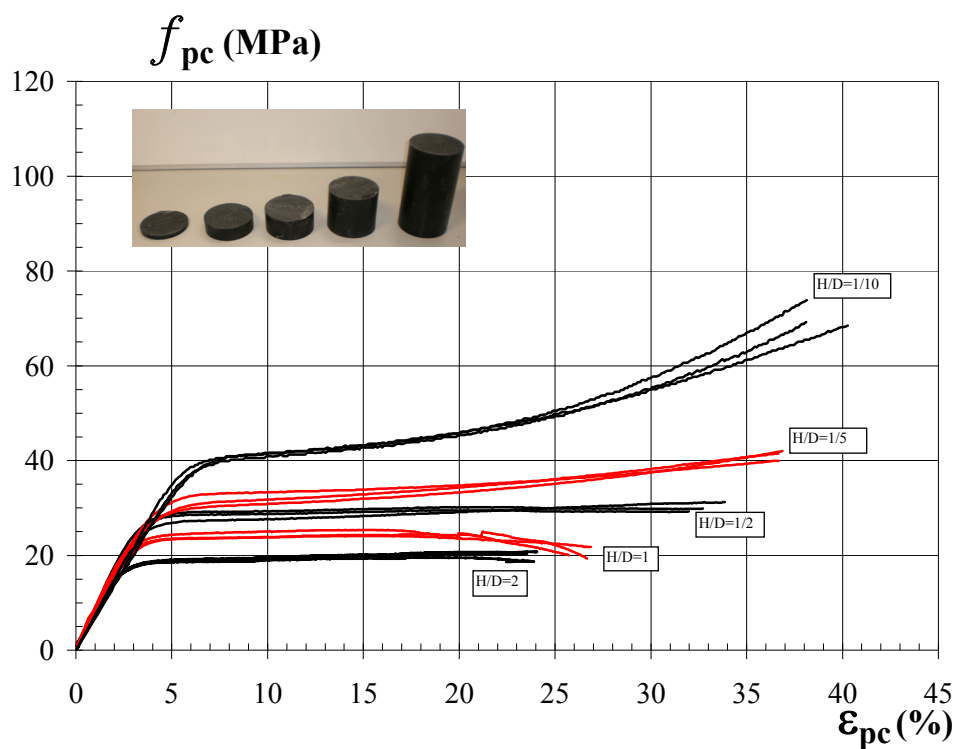


Fig.6.33- Diagramas tensão- extensão axial - Provete MC70DC, D=98 mm.

Provete	H [mm]	H/D	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC70DC D=98 [mm]	9.2	1/10	37.9	37.2	5.89	6.0	68.5	70.4	40.27	38.8	68.5	70.4	0.53	0.55
			36.7		6.10		73.5		38.02		73.5		0.55	
			36.8		5.90		69.2		38.11		69.2		0.57	
	23	1/5	31.1	29.9	5.00	5.08	39.9	40.4	36.67	35.5	39.9	41.1	0.66	0.61
			29.1		5.10		41.0		35.44		42.0		0.60	
			29.5		5.15		40.3		34.27		41.5		0.58	
	46	1/2	27.6	27.0	4.12	4.1	29.8	30.1	32.71	32.8	30.1	30.3	0.70	0.68
			26.0		4.15		31.2		33.86		31.2		0.68	
			27.3		4.10		29.2		31.98		29.5		0.66	
	92	1	22.7	22.1	3.30	3.3	20.1	20.5	25.71	26.4	25.4	24.8	0.74	0.75
			21.6		3.35		19.4		26.66		24.9		0.75	
			22.2		3.38		21.8		26.87		24.1		0.76	
	184	2	16.1	16.3	2.40	2.4	18.6	19.9	23.90	23.8	19.6	20.3	0.75	0.76
			16.2		2.45		20.4		23.54		20.4		0.76	
			16.5		2.48		20.7		24.07		20.8		0.77	

Tabela 6.10- Resultados dos ensaios à compressão – MC70DC.

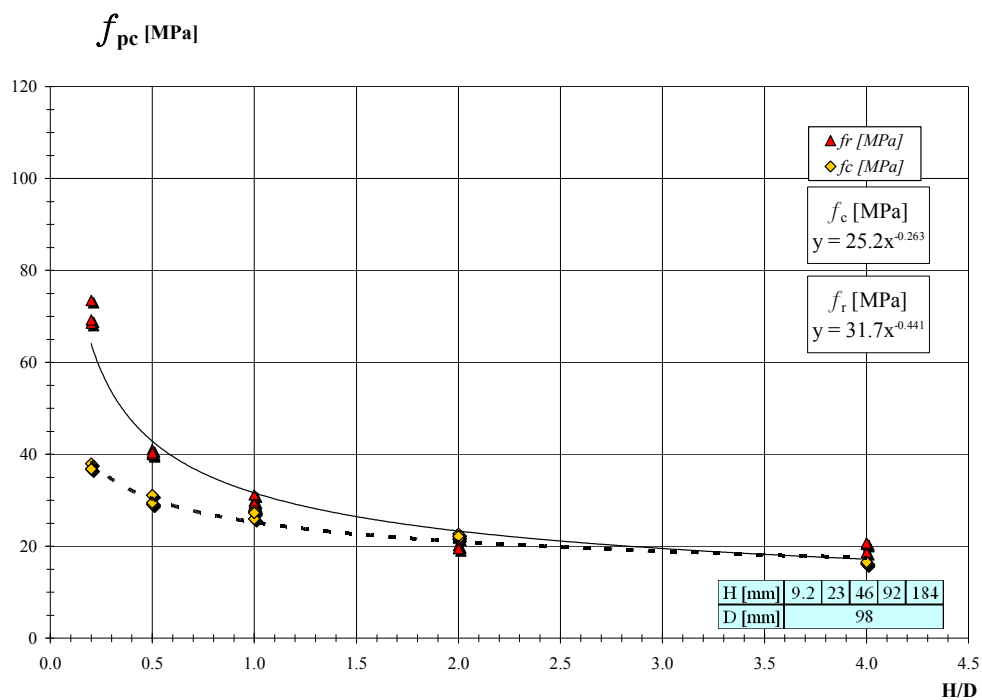


Fig.6.34- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC70DC.

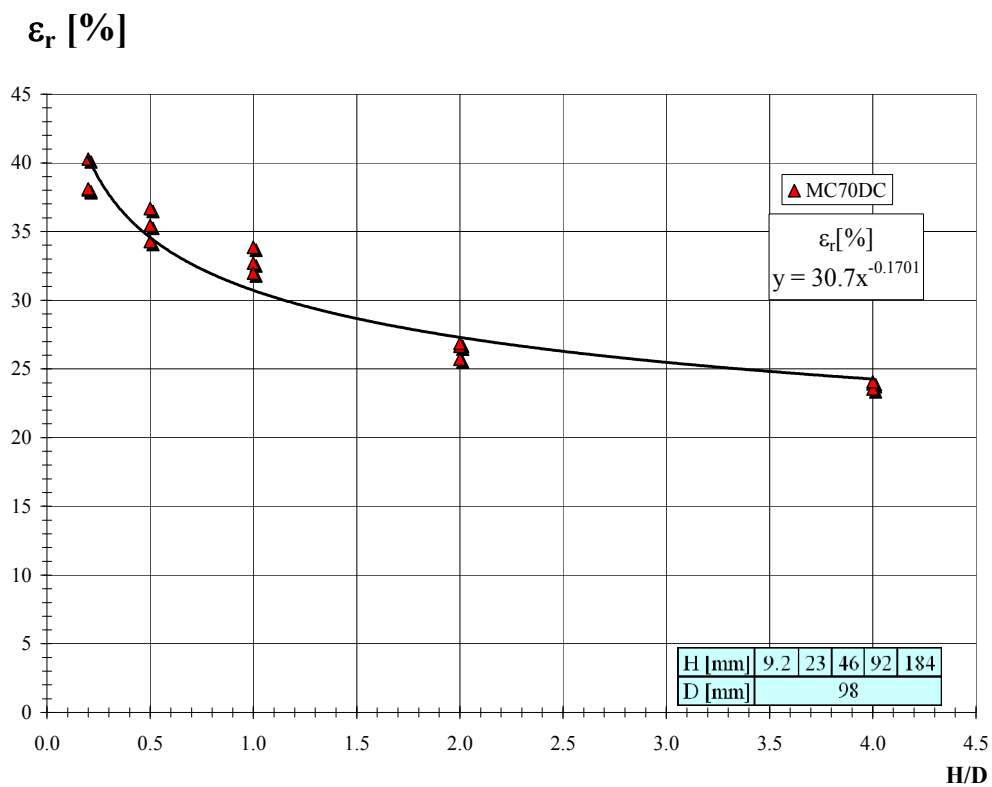


Fig.6.35- Extensão de rotura - relação de proporção (H/D) – MC70DC.

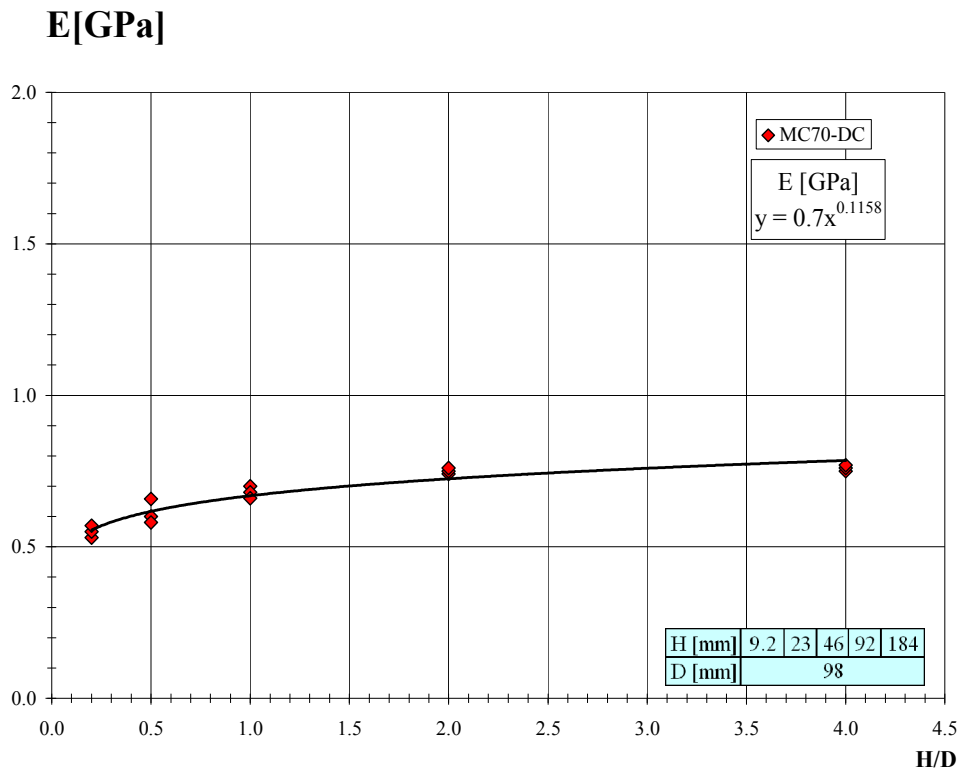


Fig.6.36- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/D) – MC70DC.

6.2.3 - ANÁLISE DE RESULTADOS

O diâmetro dos provetes influencia consideravelmente a tensão máxima de compressão. Para a mesma relação de proporção (H/D), o aumento do diâmetro do provete, faz com que a resistência do provete seja menor. Verificando-se que os provetes com dimensões superiores (D=98 mm), apresentam uma redução significativa da tensão de rotura, comparativamente com os provetes de menores dimensões (D=46 mm).

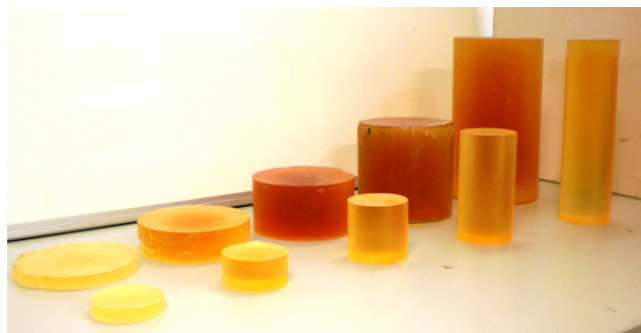


Fig.6.37- Provetes de resina MC, D=46 mm e 98 mm.

Nas Figuras 6.38 a 6.40, mostra-se uma comparação do comportamento mecânico dos provetes de diâmetro $D=46$ mm e $D=98$ mm.

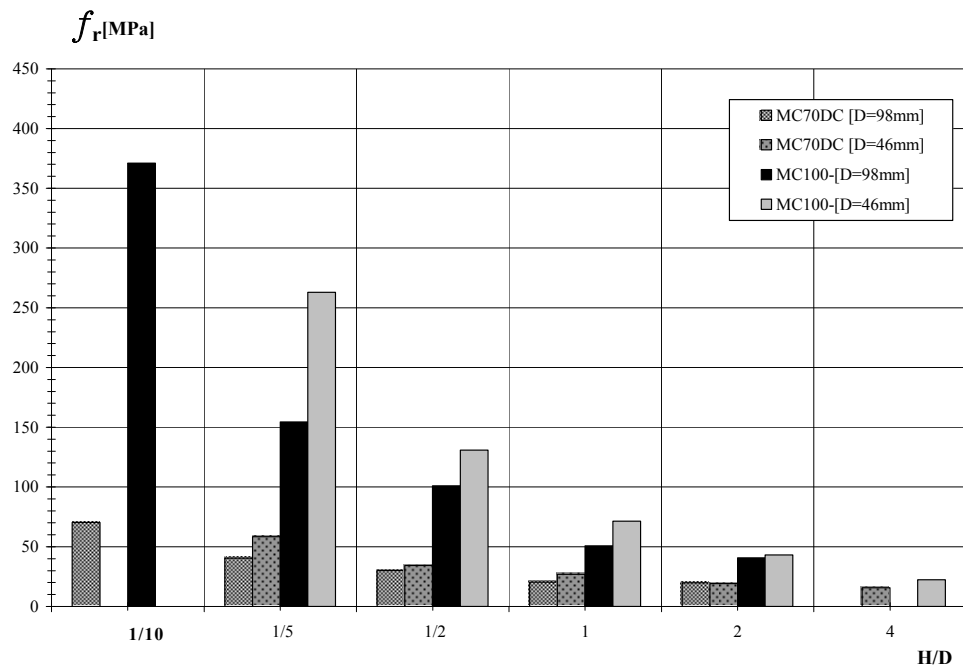


Fig.6.38- Tensão de rotura – MC100 e MC70DC ($D=46$ mm e $D=98$ mm).

H/D	MC100			MC70DC		
	D1=46 mm	D2=98 mm	D2/D1	D1=46 mm	D2=98 mm	D2/D1
	$f_{\text{máx,m}}(T1)$ [MPa]	$f_{\text{máx,m}}(T2)$ [MPa]	T2/T1	$f_{\text{máx,m}}(T1)$ [MPa]	$f_{\text{máx,m}}(T2)$ [MPa]	T2/T1
1/10	--	372.3	--	--	70.4	--
1/5	263.0	154.8	0.6	58.5	41.1	0.7
1/2	130.8	101.5	0.8	34.4	30.3	0.9
1	71.4	51.2	0.7	27.2	24.8	0.9
2	43.1	40.8	0.9	24.1	20.3	0.8
4	32.5	--	--	18.2	--	--

Tabela 6.11- Tensão de rotura – MC100 e MC70DC ($D=46$ mm e $D=98$ mm).

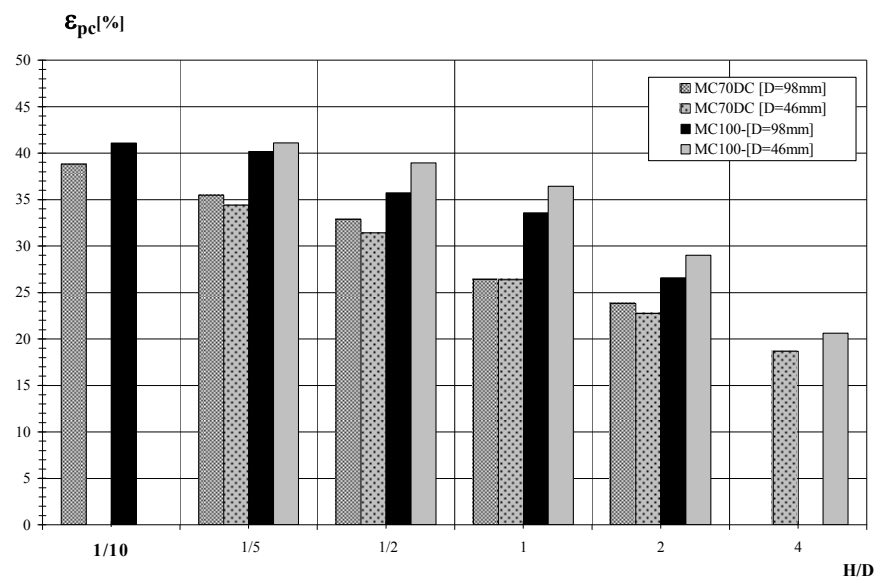


Fig. 6.39- Extensão de rotura – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm)

H/D	MC100			MC70DC		
	D1=46 mm	D2=98 mm	D2/D1	D1=46 mm	D2=98 mm	D2/D1
	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_1)$ [%]	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_2)$ [%]	$\varepsilon_2/\varepsilon_1$	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_1)$ [%]	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_2)$ [%]	$\varepsilon_2/\varepsilon_1$
1/10	--	41.1	--	--	38.8	--
1/5	41.1	40.2	1.0	34.4	35.5	1.0
1/2	38.9	35.7	0.9	31.4	32.8	1.0
1	36.4	33.6	0.9	26.4	26.4	1.0
2	29.0	26.6	0.9	22.7	23.8	1.0
4	20.6	--	--	18.7	--	--

Tabela 6.12- Extensão de rotura – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm)

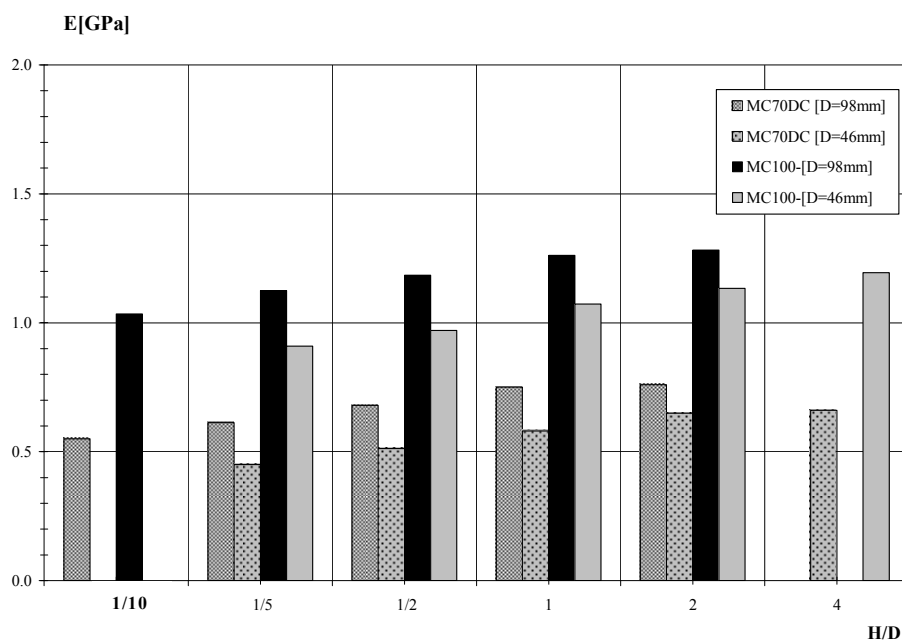


Fig. 6.40- Módulo de elasticidade – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm)

H/D	MC100			MC70DC		
	D1=46 mm	D2=98 mm	D2/D1	D1=46 mm	D2=98 mm	D2/D1
	E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	E ₂ /E ₁	E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	E ₂ /E ₁
1/10	--	1.0	--	--	0.6	--
1/5	0.9	1.1	1.2	0.5	0.6	1.4
1/2	1.0	1.2	1.2	0.5	0.7	1.3
1	1.1	1.3	1.2	0.6	0.8	1.3
2	1.1	1.3	1.1	0.7	0.8	1.2
4	1.2	--	--	0.7	--	--

Tabela 6.13- Módulo de elasticidade – MC100 e MC70DC (D=46 mm e D=98 mm)

6.3 - EFEITOS DA FORMA

Para analisar este efeito foram produzidos diversos provetes de argamassas poliméricas de forma prismática com a secção de 40x40 mm² e com cinco alturas diferentes.

Foram analisados os provetes do tipo MC85A, MC70DC e MC100. Apresentam-se na Tabela 6.14 as alturas dos provetes, bem como a sua relação com a largura da sua secção.

H [mm]	8	16	40	80	160
H/B	1/5	2/5	1	2	4

Tabela 6.14- Alturas e relação de proporção (H/B) dos provetes (B=40 mm).

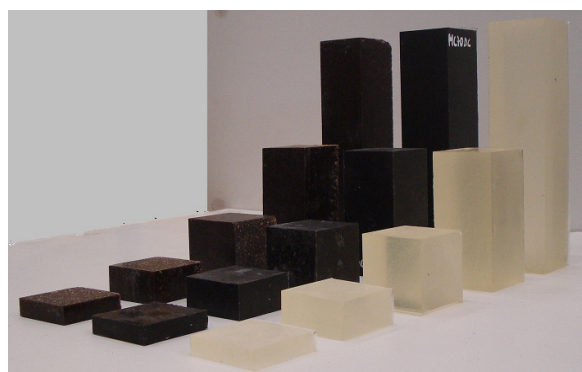


Fig.6.41- Provetes de argamassas poliméricas MC85A, MC70DC e MC100.

Apresentam-se nas figuras seguintes os diagramas de tensão – extensão dos ensaios à compressão monotónica de cada provete de argamassa polimérica analisada. Após a

apresentação de cada diagrama tensão – extensão é exibida uma tabela com os respectivos resultados.

Serão igualmente apresentados, para cada grupo de argamassas poliméricas, os diagramas de tensão, extensão e módulo de elasticidade em função da relação de proporção (H/D). Por fim será realizada uma comparação com os provetes cilíndricos de composição e relação de proporção semelhantes (sub-capítulo 6.1).

6.3.1 - RESINA MC

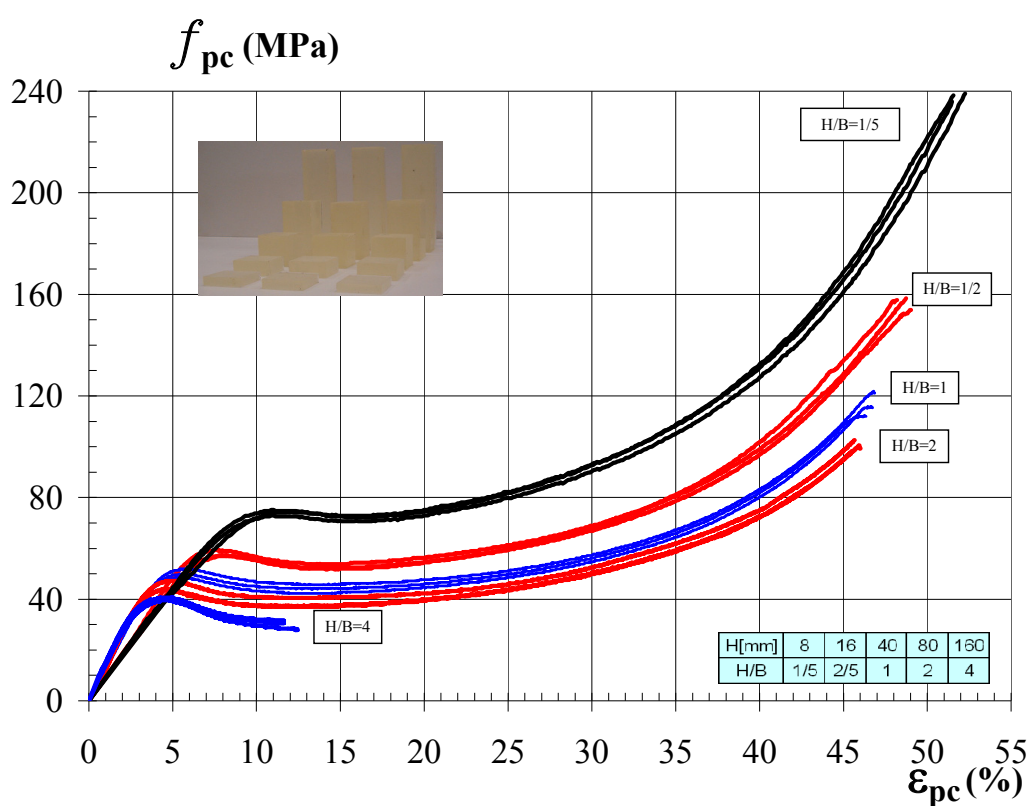


Fig.6.42- Diagramas tensão- extensão axial - Provetes MC100.

Provete	H [mm]	H/B	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC100 Prismáticos Base=40x40 [mm]	8	1/5	71.1	71.7	9.70	9.72	229.1	234.2	51.48	51.51	239.1	237.8	0.79	0.77
			71.2		9.80		237.5		51.57		238.4		0.69	
			72.8		9.66		236.0		51.48		236.0		0.84	
	16	2/5	55.0	56.3	6.90	6.88	157.7	156.5	48.19	48.66	157.8	156.7	0.85	0.88
			55.9		6.95		153.9		49.03		153.9		0.87	
			58.1		6.80		157.9		48.74		158.4		0.94	
	40	1	49.1	49.4	4.91	4.92	112.0	116.1	46.35	46.65	112.4	116.7	1.10	1.11
			50.8		4.90		121.1		46.85		122.0		1.09	
			48.1		4.95		115.4		46.74		115.8		1.14	
	80	2	43.0	43.7	3.98	3.95	98.2	100.0	45.54	45.74	98.2	100.5	1.36	1.30
			42.8		3.97		99.1		46.01		100.6		1.30	
			45.2		3.90		102.6		45.67		102.6		1.23	
	160	4	39.8	39.0	3.65	3.63	27.8	30.0	12.46	11.91	40.3	40.2	1.40	1.40
			39.1		3.60		31.5		11.63		40.6		1.42	
			38.1		3.65		30.6		11.63		39.5		1.37	

Tabela 6.15- Resultados dos ensaios à compressão – MC100.

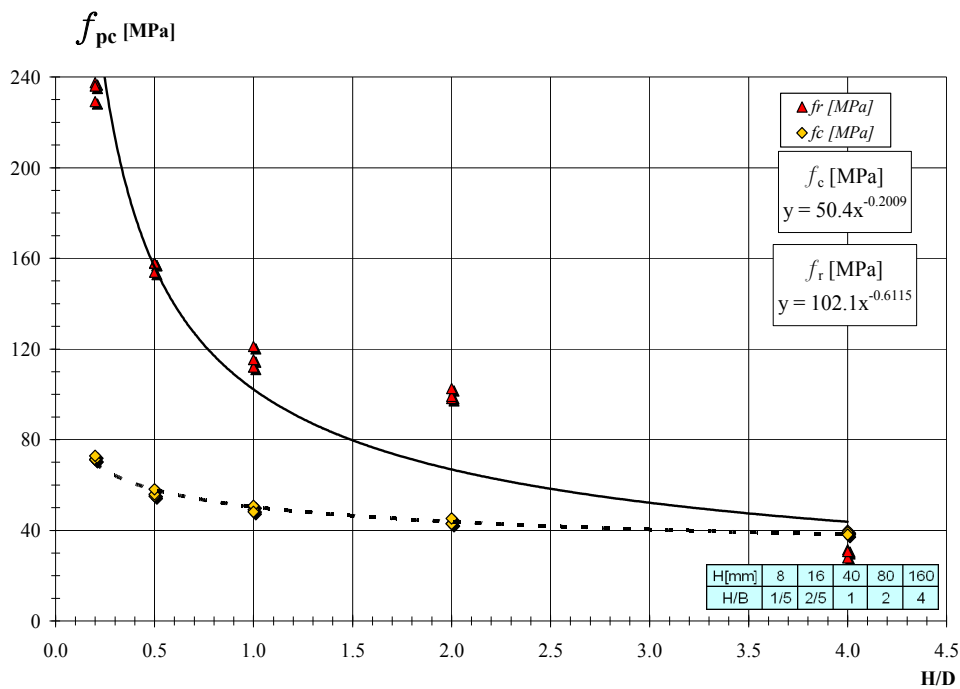


Fig.6.43- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/D) – MC100.

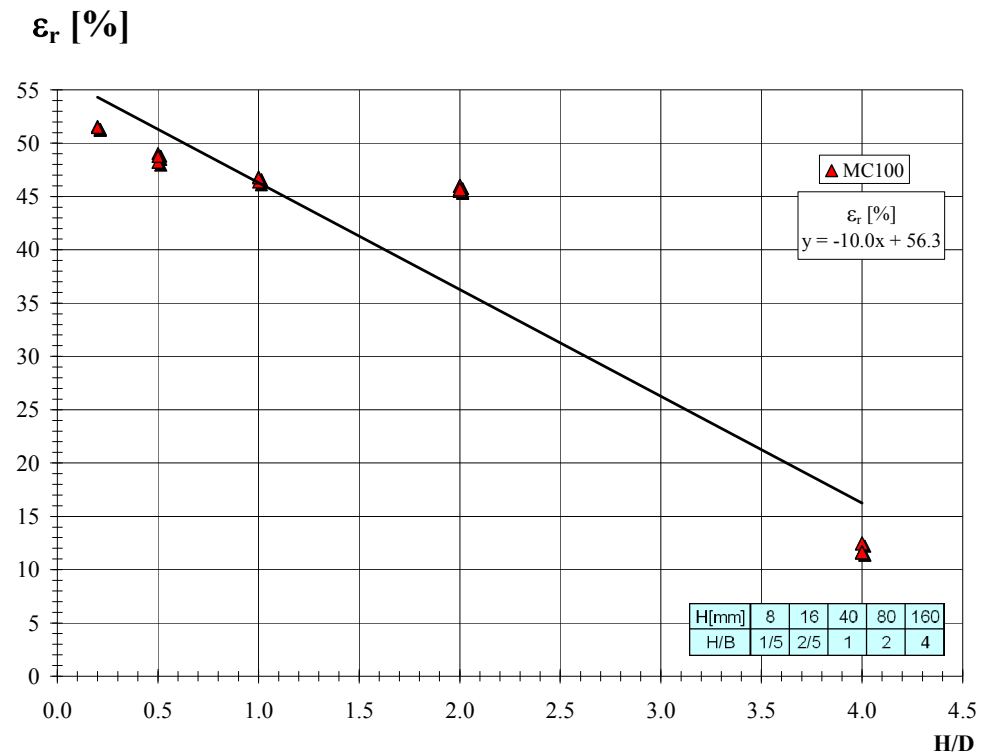


Fig.6.44- Extensão de rotura - relação de proporção (H/B) – MC100.

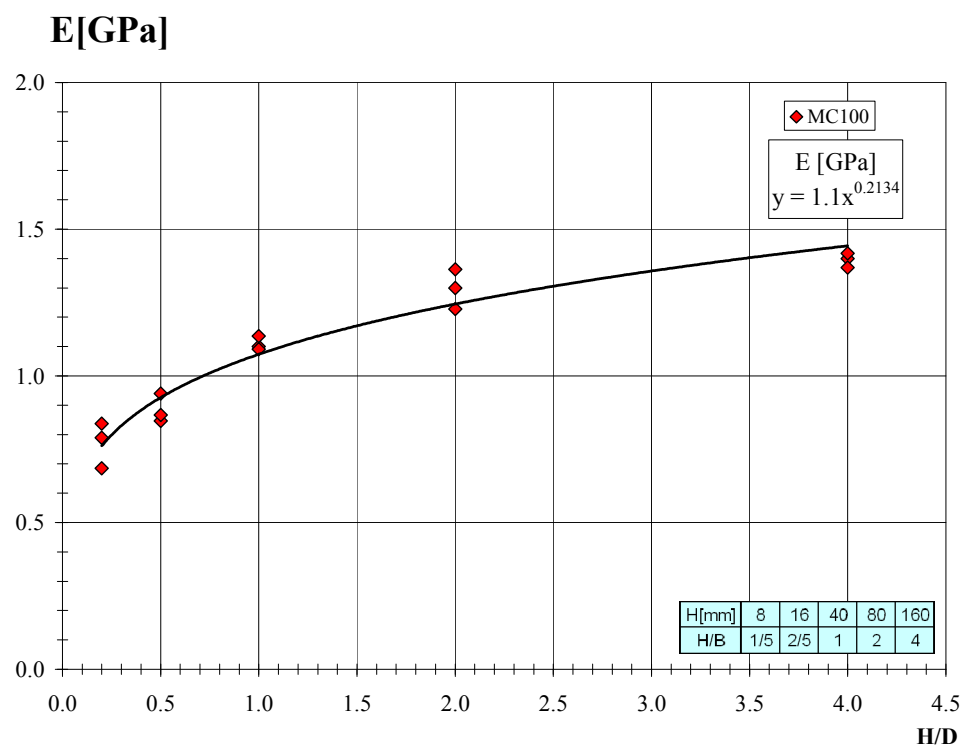


Fig.6.45- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/B) – MC100.

6.3.2 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC85A

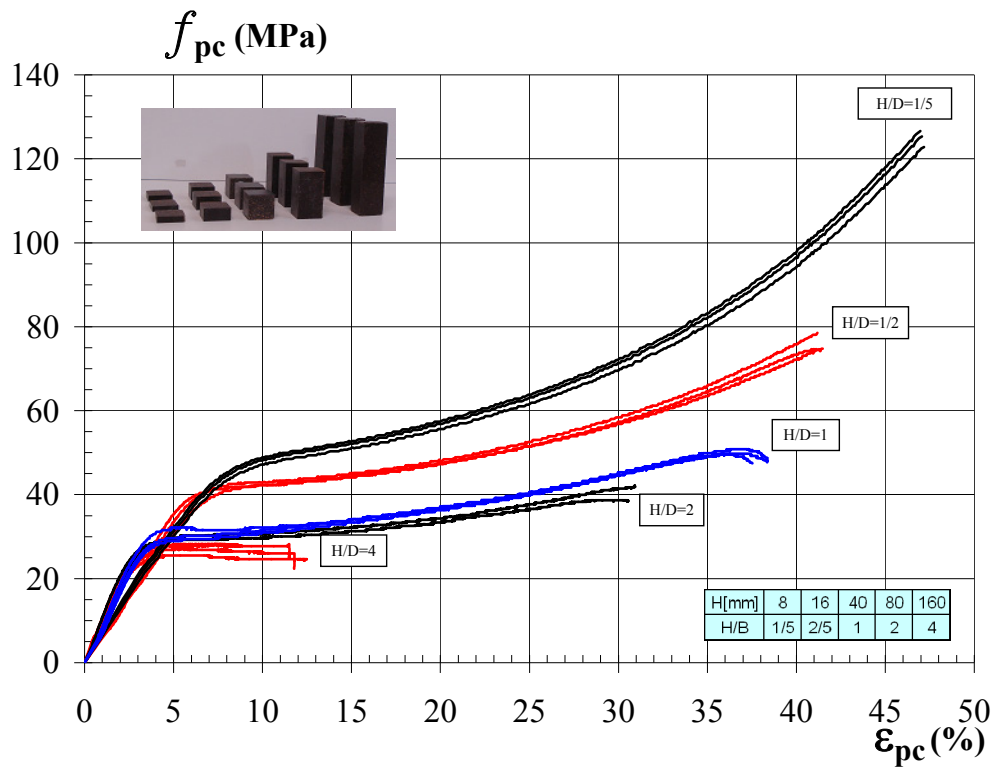


Fig.6.46- Diagramas tensão- extensão axial - Provete MC85A.

Provete	H [mm]	H/B	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\epsilon_{c,i}$ [%]	$\epsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\epsilon_{r,i}$ [%]	$\epsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC85A Prismáticos Base=40x40 [mm]	8	1/5	43.0	42.2	8.70	8.9	126.6	124.9	46.97	47.1	126.6	124.9	0.56	0.57
			41.3		9.10		122.8		47.17		122.8		0.60	
			42.2		8.80		125.4		47.07		125.4		0.56	
	16	2/5	31.6	36.1	6.90	6.58	68.5	72.6	42.28	40.2	68.5	72.6	0.62	0.68
			35.6		6.45		74.4		41.13		74.4		0.65	
			40.9		6.40		74.8		37.22		74.8		0.77	
	40	1	34.2	33.1	4.01	4.1	52.5	52.4	35.53	35.3	52.5	52.4	0.89	0.83
			31.4		4.15		52.4		35.29		52.4		0.75	
			33.6		4.20		52.4		35.00		52.4		0.85	
	80	2	32.0	32.0	3.80	3.8	42.8	44.9	30.56	31.5	43.0	45.3	1.07	1.04
			32.3		3.78		46.4		33.48		47.3		1.10	
			31.6		3.85		45.4		30.39		45.7		0.95	
	160	4	28.1	26.6	3.39	3.4	27.6	28.0	11.50	11.9	31.3	30.0	1.30	1.20
			26.2		3.40		28.9		11.79		30.3		1.10	
			25.5		3.45		27.4		12.48		28.4		1.20	

Tabela 6.16- Resultados dos ensaios à compressão – MC85A.

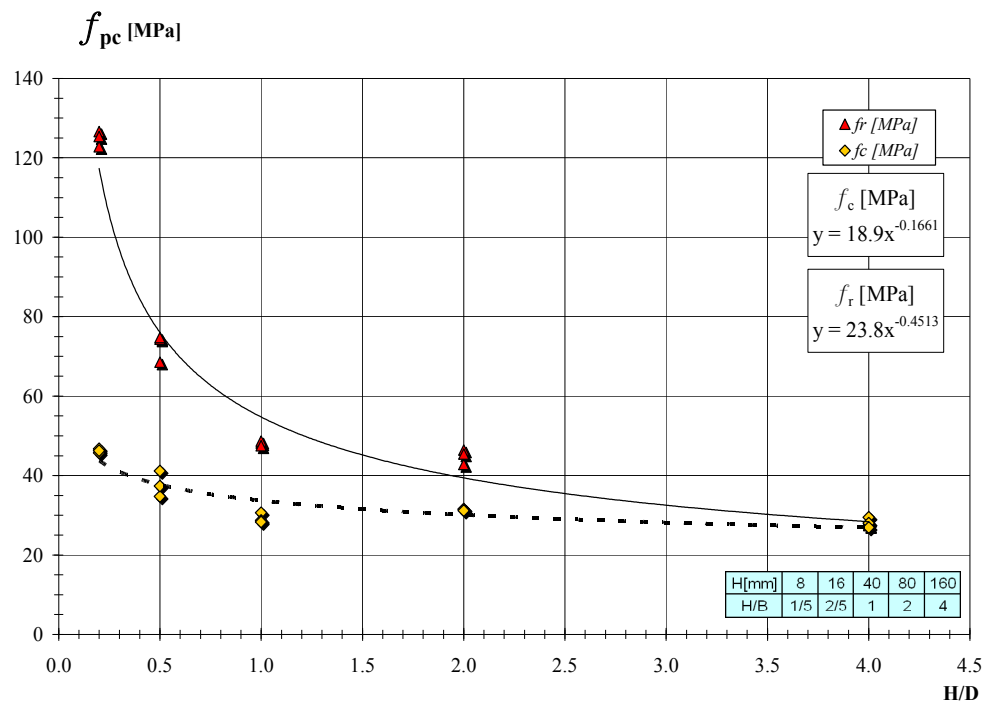


Fig.6.47- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/B) – MC85A.

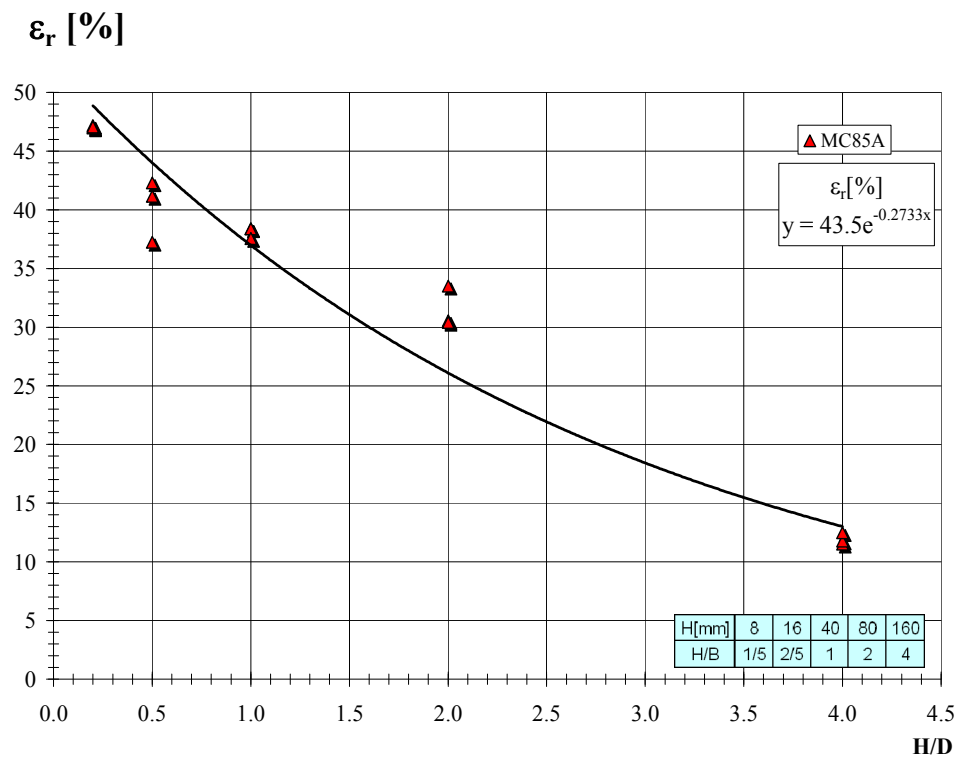


Fig.6.48- Extensão de rotura - relação de proporção (H/B) – MC85A.

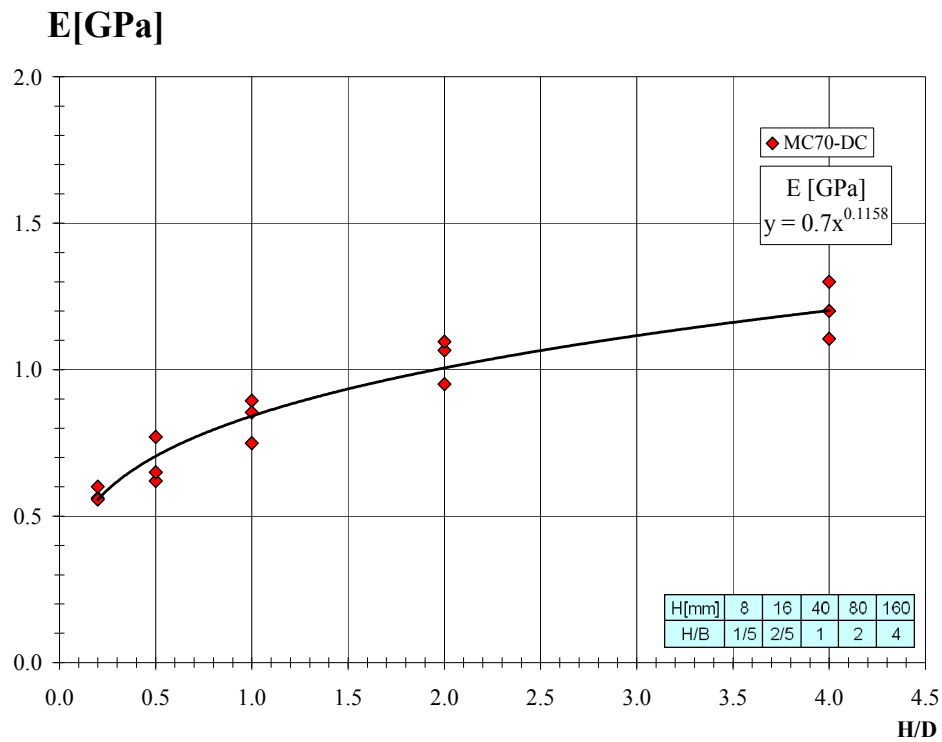


Fig.6.49- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/B) – MC85A.

6.3.3 - ARGAMASSAS POLIMÉRICAS – MC70DC

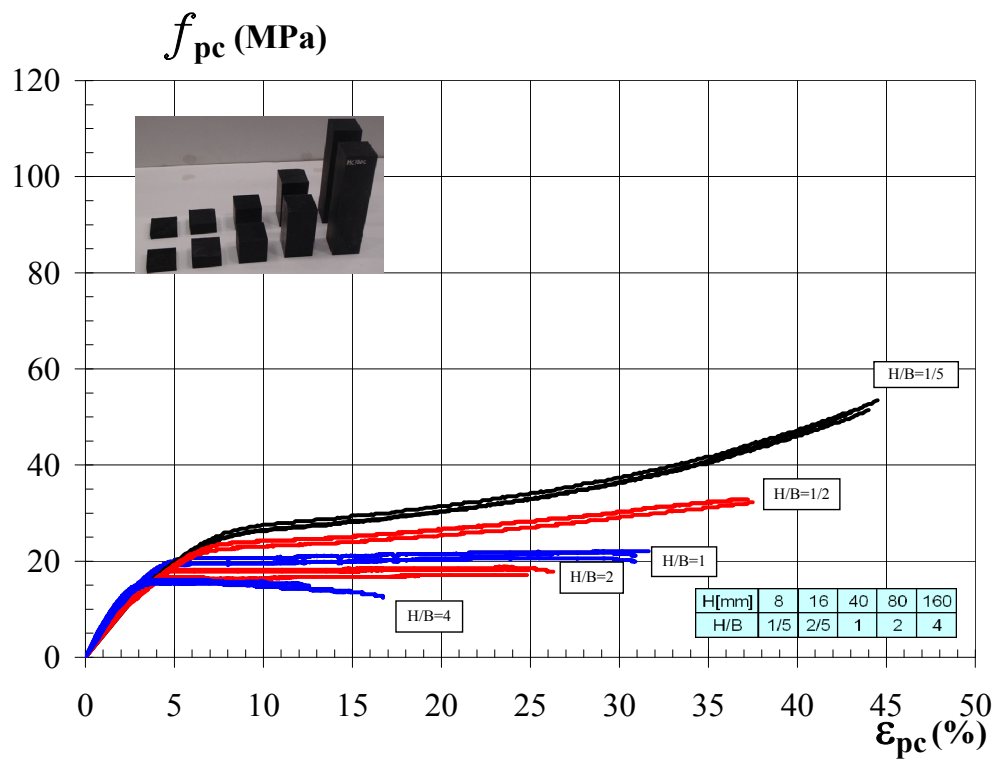


Fig.6.50- Diagramas tensão- extensão axial - Provete MC70DC.

Proвете	H [mm]	$f_{c,i}$ [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{c,i}$ [%]	$\varepsilon_{c,m}$ [%]	$f_{r,i}$ [MPa]	$f_{r,m}$ [MPa]	$\varepsilon_{r,i}$ [%]	$\varepsilon_{r,m}$ [%]	$f_{máx,i}$ [MPa]	$f_{máx,m}$ [MPa]	E_i [GPa]	E_m [GPa]
MC70DC Prismáticos Base=40x40 [mm]	8	24.0	24.3	7.36	7.3	50.9	51.9	43.01	43.8	50.9	51.9	0.31	0.31
		24.8		7.30		53.5		44.52		53.5		0.32	
		24.2		7.30		51.4		44.01		51.4		0.31	
	16	21.2	21.4	6.20	6.12	32.3	32.7	37.50	37.3	32.3	32.7	0.30	0.30
		21.4		6.00		32.8		37.17		32.8		0.30	
		21.6		6.15		32.8		37.22		32.8		0.29	
	40	18.8	19.3	5.00	4.9	20.0	21.1	30.90	31.1	20.8	21.6	0.44	0.44
		19.1		4.90		22.1		31.64		22.1		0.42	
		19.9		4.80		21.2		30.90		22.0		0.48	
	80	17.1	17.1	4.10	4.1	18.1	17.7	24.92	25.3	18.5	18.2	0.56	0.52
		16.7		4.15		17.1		24.81		17.1		0.46	
		17.5		4.00		17.8		26.30		18.9		0.56	
	160	15.0	14.7	2.95	2.9	12.4	13.5	16.72	14.9	16.1	16.0	0.52	0.60
		15.0		2.90		15.0		12.56		16.1		0.64	
		14.2		2.94		13.2		15.30		15.7		0.63	

Tabela 6.17- Resultados dos ensaios à compressão – MC70DC.

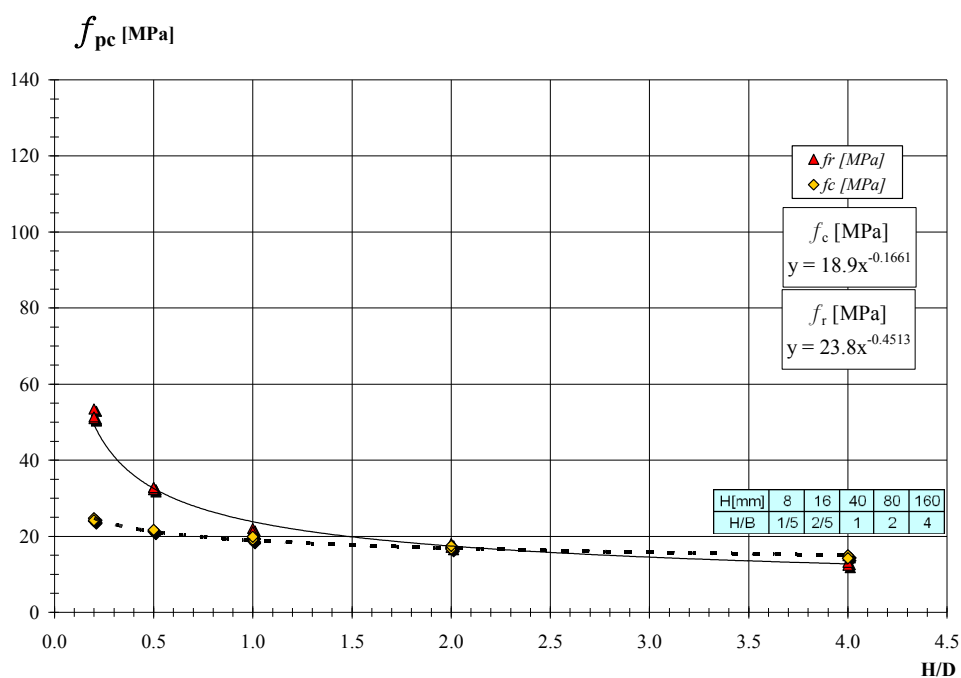


Fig.6.51- Tensão de rotura e tensão de cedência - relação de proporção (H/B) – MC70DC.

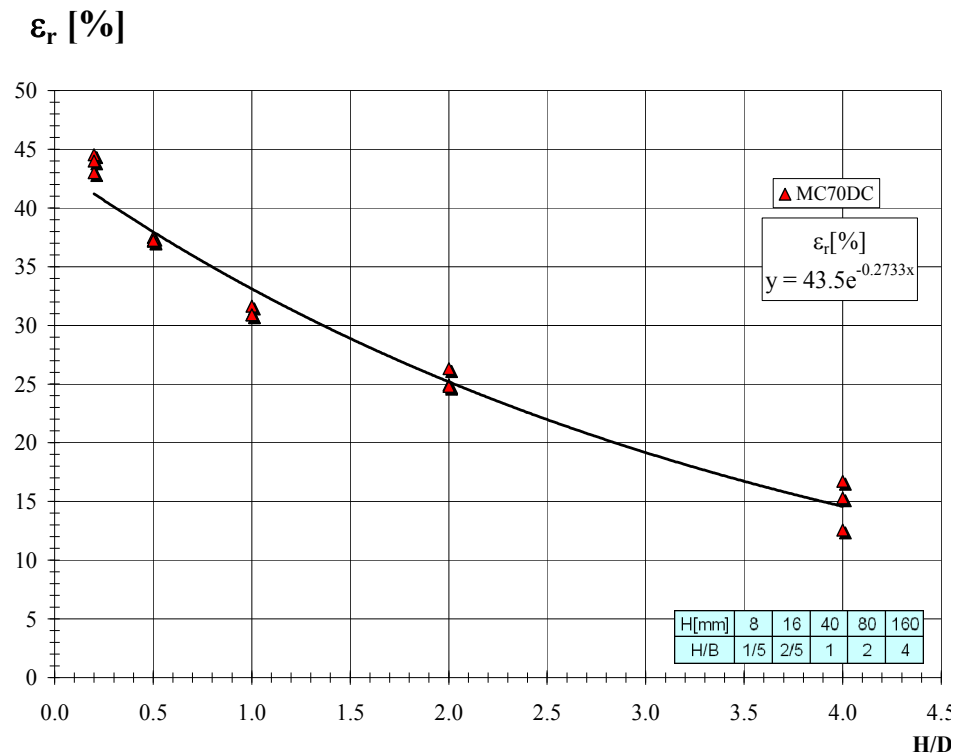


Fig.6.52- Extensão de rotura - relação de proporção (H/B) – MC70DC.

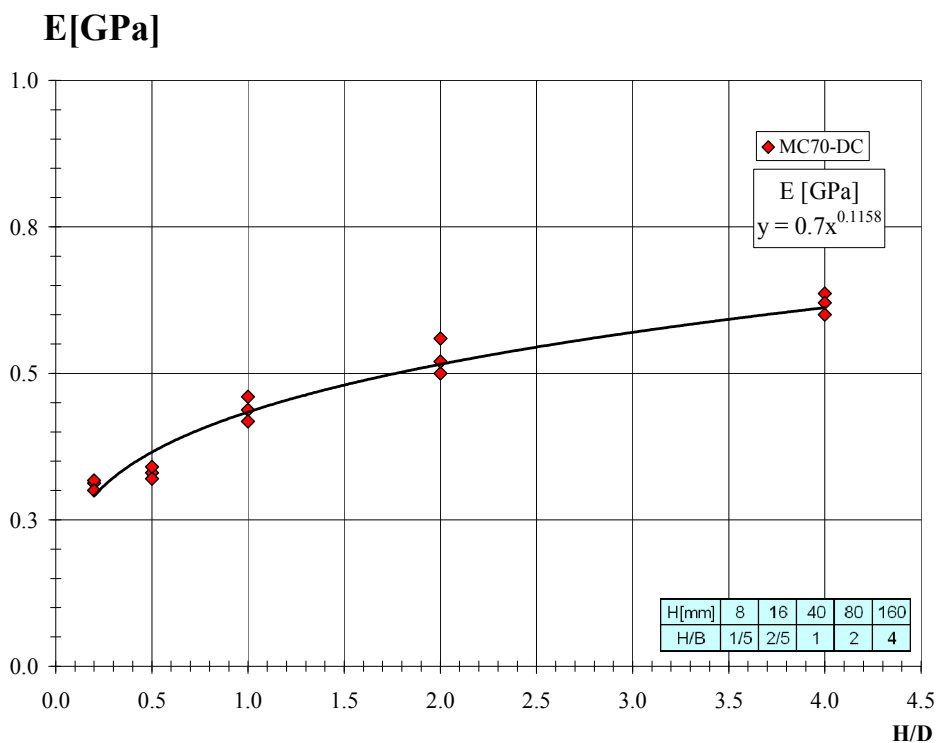


Fig.6.53- Módulo de elasticidade - relação de proporção (H/B) – MC70DC.

Na figura seguinte mostram-se os provetes prismáticos de diversas alturas, antes e após o ensaio.

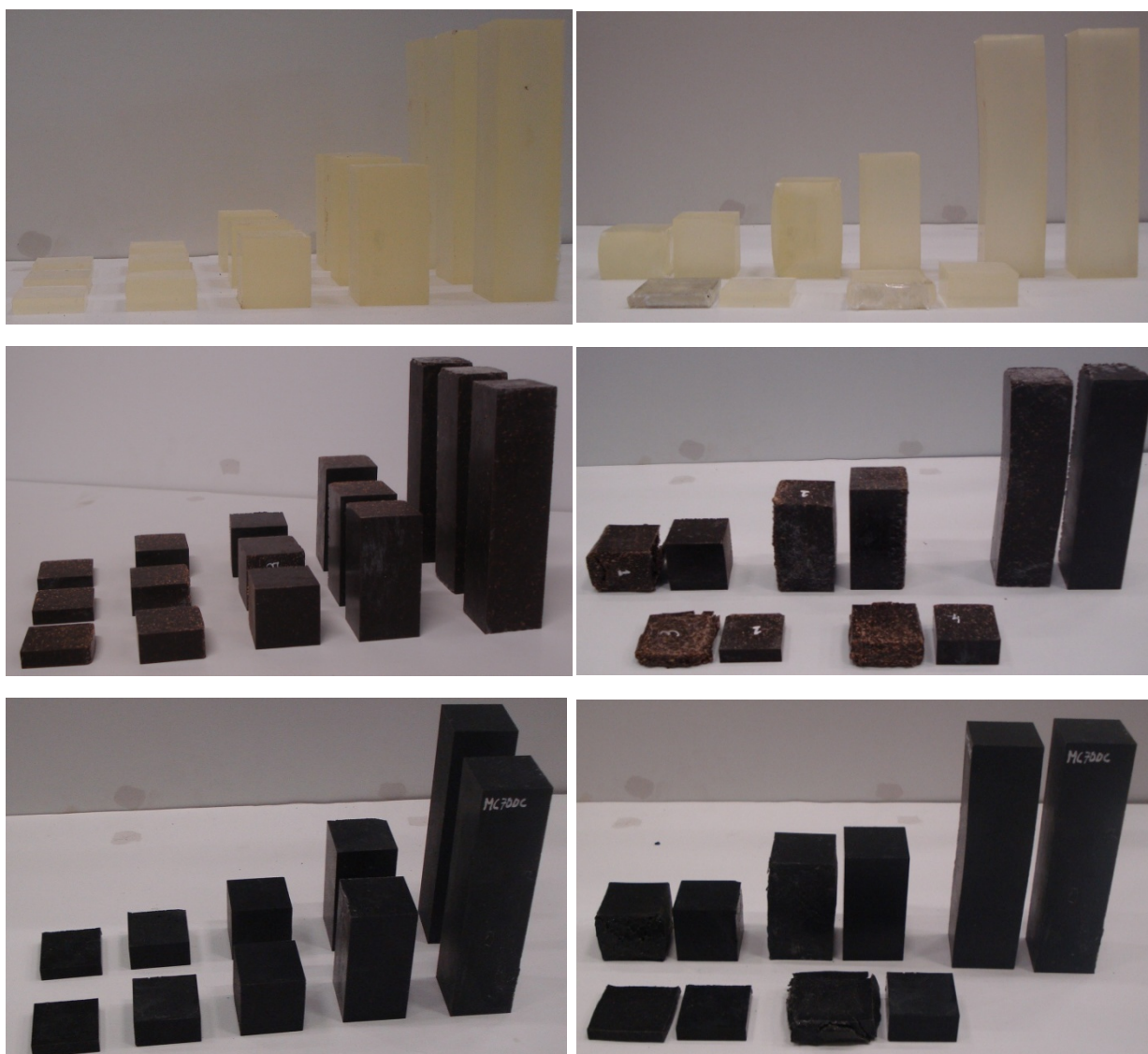


Fig.6.54- Provetes de argamassas poliméricas MC85A, MC70DC e MC100.

6.3.4 - ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos diagramas tensão-extensão (Figuras 6.42, 6.46 e 6.50) e dos gráficos da tensão de rotura, tensão de cedência, extensão de rotura e módulo de elasticidade em função da relação de proporção (H/D), acima apresentados, bem como dos resultados patentes nas Tabelas 6.15 a 6.17, permite concluir que as tensões e as extensões diminuem à medida que se aumenta a alturas dos provetes. Situação que já se verificava com os provetes de secção circular.

Nas figuras seguintes, mostra-se uma comparação dos comportamentos mecânicos dos provetes prismáticos e cilíndricos, com relações de proporção idênticas. Apresentam-se nas tabelas que sucedem as figuras seguintes, um resumo das comparações das propriedades mecânicas dos provetes acima referidos.

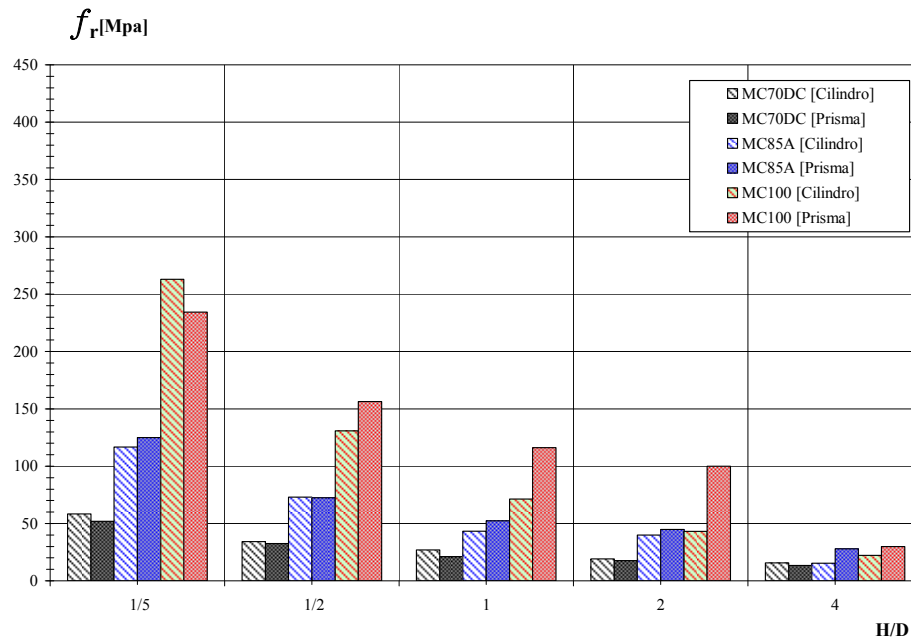


Fig.6.55- Tensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).

Provete	MC85A			MC70DC			MC100		
	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P
H/D	$f_{\text{máx,m}}(T1)$ [MPa]	$f_{\text{máx,m}}(T2)$ [MPa]	T2/T1	$f_{\text{máx,m}}(T1)$ [MPa]	$f_{\text{máx,m}}(T2)$ [MPa]	T2/T1	$f_{\text{máx,m}}(T1)$ [MPa]	$f_{\text{máx,m}}(T2)$ [MPa]	T2/T1
1/5	124.9	117.0	0.9	51.9	58.5	1.1	237.8	263.0	1.1
1/2-2/5	72.6	73.1	1.0	32.7	34.4	1.1	156.7	130.8	0.8
1	52.4	44.1	0.8	21.6	27.2	1.3	116.7	71.4	0.6
2	45.3	40.1	0.9	18.2	24.1	1.3	100.5	43.1	0.4
4	30.0	18.7	0.6	16.0	18.2	1.1	40.2	32.5	0.8

Tabela 6.18- Tensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas de secção 40x40 mm e cilindro – D=46 mm).

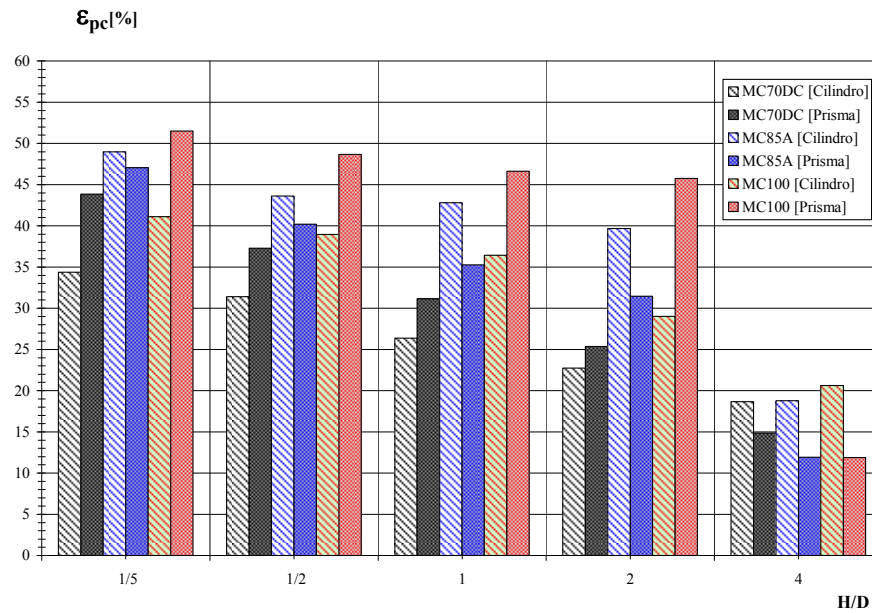


Fig.6.56- Extensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).

Provete	MC85A			MC70DC			MC100		
	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P
H/D	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_1)$ [%]	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_2)$ [%]	$\varepsilon_2/\varepsilon_1$	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_1)$ [%]	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_2)$ [%]	$\varepsilon_2/\varepsilon_1$	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_1)$ [%]	$\varepsilon_{\text{máx}} (\varepsilon_2)$ [%]	$\varepsilon_2/\varepsilon_1$
1/5	47.1	49.0	1.0	43.8	34.4	0.8	51.5	41.1	0.8
1/2-2/5	40.2	43.6	1.1	37.3	31.4	0.8	48.7	38.9	0.8
1	35.3	42.8	1.2	31.1	26.4	0.8	46.6	36.4	0.8
2	31.5	39.7	1.3	25.3	22.7	0.9	45.7	29.0	0.6
4	11.9	18.8	1.6	14.9	18.7	1.3	11.9	20.6	1.7

Tabela 6.19- Extensão de rotura à compressão – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).

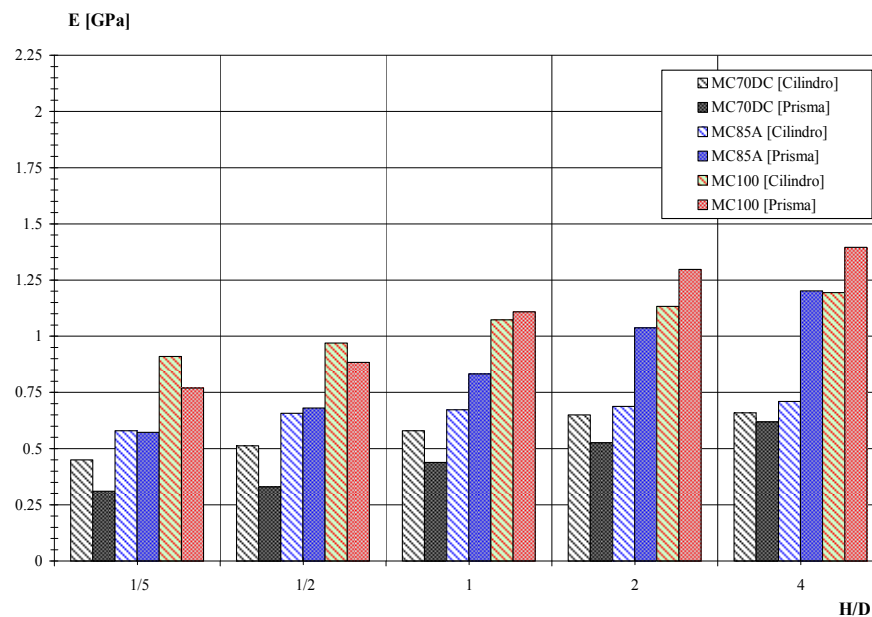


Fig.6.57- Módulo de elasticidade – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).

Provete	MC85A			MC70DC			MC100		
	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P	Prisma (P)	Cilindro (C)	C/P
H/D	E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	E2/E1	E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	E2/E1	E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	E2/E1
1/5	0.6	0.6	1.0	0.3	0.5	1.5	0.8	0.9	1.2
1/2-2/5	0.7	0.7	1.0	0.3	0.5	1.6	0.9	1.0	1.1
1	0.8	0.7	0.8	0.4	0.6	1.3	1.1	1.1	1.0
2	1.0	0.7	0.7	0.5	0.7	1.2	1.3	1.1	0.9
4	1.2	0.7	0.6	0.6	0.7	1.1	1.4	1.2	0.9

Tabela 6.20- Módulo de elasticidade – H/D. MC85A, MC70DC e MC100 (prismas e cilindros).

A análise das Figuras 6.55 a 6.57 e dos resultados das Tabelas 6.18 a 6.20, permite retirar as seguintes ilações sobre o comportamento dos provetes de forma prismática e cilíndrica, com composições e proporções de dimensões idênticas:

- ❖ Em termos de resistência, verificam-se geralmente valores mais elevados para provetes de forma prismática. Apenas as argamassas MC70DC apresentam valores de resistência inferiores para os provetes de forma prismática. Os provetes de resina MC e os de argamassas MC85A de forma prismática apresentam valores de tensão superiores em cerca de 24% e 14%, respectivamente, comparativamente com provetes de forma cilíndrica com composições e proporções de dimensões idênticas;
- ❖ O módulo de elasticidade para os provetes de resina MC de forma prismática e cilíndrica apresenta valores idênticos. As argamassas MC70DC de forma prismática apresentam valores inferiores em cerca de 33%, enquanto que as argamassas MC85A com forma prismática apresentam valores superiores em cerca de 19%, comparativamente com os provetes com forma cilíndrica;
- ❖ No que diz respeito à extensão de rotura, os provetes de resina MC e os de argamassas MC70DC de forma prismática apresentam valores ligeiramente superiores em cerca de 6%. As argamassas MC85A com forma cilíndrica apresentam valores de extensão superiores em cerca de 24%, comparativamente com as argamassas MC85A com forma prismática.

Capítulo 7

7 - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação pretendeu avaliar a possibilidade de produzir argamassas poliméricas de elevado desempenho e de baixo custo (ambiental e económico). O objectivo principal deste trabalho foi estudar o comportamento mecânico das argamassas poliméricas de agregados leves quando são submetidas às acções monotónicas.

Este estudo incidiu em dois temas fundamentais:

- ✓ O efeito da composição no comportamento mecânico das argamassas poliméricas;
- ✓ O efeito da escala (*“Scale effect”*) no comportamento mecânico das argamassas poliméricas.

Para tal, foi programada uma campanha experimental que envolveu a caracterização dos materiais constituintes das argamassas poliméricas. Foram produzidas diversas composições que incorporaram dois tipos de resinas epoxídicas (MC e IC) e dois tipos de agregados leves (cortiça e borracha), ambos em duas disposições granulométricas, A e E (cortiça), DC e RA (borracha).

Nos capítulos anteriores, à medida que se analisavam os diversos temas, foram sendo apontadas as respectivas conclusões. Neste capítulo apresenta-se uma síntese das principais conclusões referidas ao longo deste estudo, assim como um resumo dos principais aspectos nele desenvolvidos. Referem-se ainda alguns temas que poderão ser objecto de desenvolvimentos futuros.

7.1 - SÍNTESE GLOBAL

No primeiro capítulo fez-se uma abordagem aos novos materiais baseados em polímeros, destacando as suas propriedades e o interesse cada vez maior na sua investigação. Fez-se uma breve introdução aos polímeros, com uma maior ênfase às resinas epoxídicas, destacando-se as aplicações em engenharia civil. Por fim, abordaram-se as argamassas poliméricas e indicaram-se algumas aplicações deste tipo de material.

No capítulo 2 apresentaram-se alguns trabalhos de investigação desenvolvidos por diversos autores sobre o comportamento mecânico de argamassas poliméricas. Referiram-se, igualmente, alguns estudos realizados sobre o comportamento de argamassas poliméricas quando sujeitas a acções monotónicas e cíclicas, e a testes de envelhecimento acelerados.

Constatou-se a necessidade de investigação nesta área, em especial no que se refere à influência das dimensões dos provetes na sua caracterização mecânica, quer à tracção por flexão, quer à compressão monotónica ou cíclica.

No capítulo 3 fez-se a apresentação do programa experimental e da metodologia do estudo. Apresentaram-se os parâmetros a estudar (o tipo da resina epoxídica, o tipo de agregado, a geometria) e referiram-se os preparativos e cuidados tidos na execução dos provetes. Descreveu-se o sistema de ensaio, a instrumentação dos modelos e os procedimentos utilizados nos ensaios.

Fez-se no capítulo 4 a caracterização das propriedades mecânicas dos dois tipos de resinas epoxídicas (MC e IC). Apresentaram-se os ensaios realizados para caracterizar as resinas, e fez-se uma comparação com as características fornecidas pelo fabricante das mesmas. Estes ensaios são muito úteis em termos de controlo de qualidade das resinas.

Apresentaram-se, no capítulo 5, os resultados dos ensaios experimentais dos provetes de argamassas poliméricas e de resinas epoxídicas, submetidos a acções monotónicas. O objectivo dos ensaios realizados era estudar o efeito da composição no comportamento mecânico das argamassas poliméricas. Com esta premissa foram produzidos diversos tipos de argamassas poliméricas, com dois tipos de resinas epoxídicas, e dois tipos de agregados, ambos com dois tipos de granulometria, cujas proporções de misturas se variaram. Estas

argamassas foram submetidas a ensaios de flexão e de compressão monotónica, tendo-se obtido os respectivos diagramas tensão-deformação e os diversos parâmetros inerentes à caracterização mecânica: tensão de cedência e de rotura à compressão, tensão de rotura à tracção por flexão e respectivas extensões e módulos de elasticidade. Neste capítulo analisaram-se os diversos parâmetros dando um maior destaque à influência do tipo de resina epoxídica e de agregado no comportamento mecânico das argamassas poliméricas.

No capítulo 6, tendo por objectivo o estudo do efeito de escala no comportamento mecânico desses materiais, fez-se a apresentação e análise dos ensaios à compressão monotónica de diversos provetes de argamassas poliméricas e resinas epoxídicas, com cinco alturas e três secções transversais diferentes. Foram consideradas duas secções circulares e uma quadrada.

7.2 - CONCLUSÕES

Em seguida faz-se uma síntese das principais conclusões em função dos ensaios de flexão e compressão monotónica realizados e dos diversos parâmetros analisados.

Tipo de resina

Utilizaram-se dois tipos de resina, MC e IC, como ligante. Estas têm um papel importante na resistência mecânica das argamassas poliméricas, quer à flexão, quer em compressão.

Em termos de resistência à tracção por flexão, os provetes de resina IC apresentaram um valor médio de 48,7 MPa, superior aos provetes de resina MC (34,7 MPa). No que diz respeito ao módulo de elasticidade em tracção por flexão também o valor médio nos provetes de resina IC foi superior ao valor médio apresentado nos provetes de resina MC. Contudo, é de realçar o facto da extensão de rotura ser bastante superior nos provetes de resina MC (11,99%) comparativamente aos provetes de resina IC (3,09%).

Os valores de resistência à compressão monotónica foram também superiores nos provetes de resina IC, sendo a tensão de cedência da resina IC de 87.3 MPa e da resina MC de 49.4 MPa. Constatou-se que o módulo de elasticidade apresentado pelos provetes de resina IC (3.62 GPa) foi superior ao valor apresentado nos provetes de resina MC (1.1 GPa). Em termos de

extensão de rotura à compressão os provetes de resina IC apresentaram, igualmente, valores superiores aos da resina MC.

O comportamento mecânico das argamassas poliméricas é melhor ou pior conforme as características resistentes das resinas que lhe servem de base. A análise dos resultados permite retirar as seguintes ilações:

- ❖ Nos ensaios à tracção por flexão, os provetes de argamassas epoxídicas com base na resina IC, apresentaram valores de resistência, em média 18% mais elevados que as argamassas epoxídicas com a resina MC, para a mesma proporção (resina/agregado). Da mesma forma, o módulo de elasticidade das argamassas epoxídicas com base na resina IC apresentou em média valores superiores em cerca de 68%. Todavia, a extensão de rotura registou valores médios superiores em 65%, no caso das argamassas com base na resina MC.
- ❖ Nos ensaios à compressão monotónica, verificou-se que os provetes de argamassas epoxídicas com base de resina IC, apresentaram na maioria das situações valores de resistências à compressão superiores aos das argamassas baseadas na resina MC. A excepção ocorreu no caso das argamassas IC-E, que apresentaram valores de tensão, em média cerca de 28% inferiores, comparativamente com as argamassas MC-E. No que diz respeito às outras composições, as argamassas IC-A, apresentaram valores de resistência à compressão 33% superiores face às argamassas MC-A. Situação idêntica verificou-se com as argamassas IC-DC e IC-RA que apresentaram valores de resistência à compressão superiores em de 28%, comparativamente com as MC-DC e MC-RA. Quanto ao módulo de elasticidade em compressão, as argamassas epoxídicas com base na resina IC, apresentaram valores superiores em cerca de 65%, face às argamassas com base na resina MC. Por fim, tal como tinha acontecido em flexão, verificou-se que a extensão de rotura foi superior nas argamassas com base na resina MC.

Em suma, concluiu-se que, tal como era expectável, uma resina com melhores características mecânicas permite obter uma argamassas poliméricas de agregados leves com melhores características quer à tracção quer à compressão monotónica.

Tipo de Agregado

As argamassas epoxídicas com agregados de maiores granulometrias (E e RA), apresentaram menores valores de resistência, à flexão e à compressão, comparativamente com as argamassas com agregados mais finos (A e DC).

Nos ensaios de flexão, as argamassas poliméricas que apresentaram maiores valores de resistência à tracção foram as que nas suas composições tinham o agregado DC de pó de borracha.

Nos ensaios de compressão monotónica, as argamassas poliméricas que na maioria das situações obtiveram melhor desempenho foram as argamassas com o agregado A de pó de cortiça, independentemente do tipo de resina, excepção feita às argamassas IC85DC que apresentaram valores de resistência 10% superiores.

Geometria dos provetes

A geometria dos provetes tem uma grande influência no seu comportamento mecânico. Este parâmetro foi analisado nos ensaios à compressão monotónica, nos diversos provetes de diferentes geometrias e composições. Dividiu-se em três sub-parâmetros, nomeadamente o efeito da variação altura, da variação do diâmetro e do efeito da variação da forma da secção transversal.

Efeito da variação de altura:

- ❖ As tensões e extensões diminuem à medida que se aumenta a altura dos provetes;
- ❖ Em todos os tipos de argamassas poliméricas, constata-se que nos provetes com $H/D > 2$ a tensão de rotura é inferior à tensão de cedência.

Efeito da variação do diâmetro:

- ❖ O diâmetro influencia consideravelmente a capacidade resistente do provete. Para a mesma relação de proporção (H/D), o aumento do diâmetro do provete, faz com que a resistência à compressão do provete diminua. Verificando-se que os provetes com dimensões superiores ($D=98$ mm) apresentaram uma redução significativa da tensão

de rotura, comparativamente com os provetes de menores dimensões (D=46 mm).
Todavia o aumento do diâmetro faz com que a rigidez do provete aumente.

Efeito da variação da forma da secção transversal:

- ❖ Tal como se verificou com os provetes de secção circular, as tensões e as extensões nos provetes de secção quadrada, diminuem à medida que se aumenta a altura dos provetes.
- ❖ Em termos de resistência verificaram-se geralmente valores mais elevados para provetes de forma prismática comparativamente com provetes de forma cilíndrica com composições e proporções de dimensões idênticas;
- ❖ O módulo de elasticidade para os provetes de resina MC de forma prismática e cilíndrica apresentou valores idênticos. As argamassas MC70DC de forma prismática apresentaram valores inferiores em cerca de 33%, enquanto que as argamassas MC85A com forma prismática apresentaram valores superiores em cerca de 19%, comparativamente com os provetes com forma cilíndrica;
- ❖ No que diz respeito à extensão de rotura, os provetes de resina MC e os de argamassas MC70DC de forma prismática apresentaram valores ligeiramente superiores em cerca de 6%. As argamassas MC85A com forma cilíndrica apresentaram valores de extensão superiores em cerca de 24%, comparativamente com as argamassas MC85A com forma prismática.

7.3 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como possíveis desenvolvimentos futuros nesta área, refira-se em termos do comportamento das argamassas com agregados leves a necessidade de avaliar o seu comportamento mecânico quando sujeitas a acções ambientais de envelhecimento artificial.

Outro aspecto pertinente, será simular o comportamento à flexão e à compressão monotónica das argamassas poliméricas através de modelos numéricos de elementos finitos, considerando o comportamento não linear dos materiais e quantificando a influência dos diversos parâmetros através de uma análise paramétrica.

REREFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Vegt, A.K.v.d., *From polymers to plastics*. 2002: p. 268.
2. Rocha, A., *Materiais Plásticos Para A Construção Civil*. Lisboa, LNEC, 1996. **ISBN22079933 4**.
3. Pipa, M., *Emprego de resinas epoxy na construção*. LNEC- Proc. 30/11/8473, Obra 32/53/423, 1987.
4. Fowler, D.W., *Polymers in concrete: a vision for the 21st century*. Cement and Concrete Composites, 1999. **21**(5-6): p. 449-452.
5. Ribeiro, M.C.S., et al., *Mechanical Behaviour of Polymer Concrete Modified with Light Organic Aggregates*. 2nd International Conference on Eco-Composites, Queen Mary, University of London, UK, 2003.
6. Nóvoa, P.J.R.O., et al., *Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates*. Composites Science and Technology, 2004. **64**(13-14): p. 2197-2205.
7. Ribeiro, M.C.S., et al., *Mechanical Characterisation of lightweight Wood-Modified Polymer Concrete*. Ciência & Tecnologia dos Materiais 2004. **16**(2-3): p. 81-87.
8. Ribeiro, M.C.S., et al., *Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions*. Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(7): p. 803-809.
9. Nóvoa, P.J.R.O., M.C.S. Ribeiro, and A.J.M. Ferreira, *Development of Lightweight Polymer Mortars Based on Binary Aggregate Compositions*. Composites in Construction – Third International Conference, Lyon, France, 2005.
10. ASTM-D790-02, *Standard Test Method for for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. Annual Book of ASTM Standards, 2002.
11. Rodrigues, C.C. and M.A.G. Silva, *Cyclic Compression Behaviour of Polymer Concrete*. Journal of Polymer Engineering, 27(7):525, 2007.

12. Silva, M.A.G., Z.C.G. Silva, and J. Simão, *Petrographic and mechanical aspects of accelerated ageing of polymeric mortars*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(2): p. 146-156.
13. Ribeiro, M.C.S., C.M.L. Tavares, and A.J.M. Ferreira, *Chemical resistance of epoxy and polyester concrete to acids and salts*. Journal of Polymer Engineering, Freund House 2002. **24** (1):**27-44**.
14. Mani, P., A.K. Gupta, and S. Krishnamoorthy, *Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(3): p. 157-163.
15. Rebeiz, K.S., *Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste*. Construction and Building Materials, 1996. **10**(3): p. 215-220.
16. Jo, B.-W., S.-K. Park, and J.-C. Park, *Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, 2007. **In Press, Corrected Proof**.
17. Jo, B.-W., G.-H. Tae, and C.-H. Kim, *Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(7): p. 1552-1559.
18. Mahdi, F., A.A. Khan, and H. Abbas, *Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(3): p. 241-248.
19. Varughese, K.T. and B.K. Chaturvedi, *Fly ash as fine aggregate in polyester based polymer concrete*. Cement and Concrete Composites, 1996. **18**(2): p. 105-108.
20. Gorninski, J.P., D.C. Dal Molin, and C.S. Kazmierczak, *Strength degradation of polymer concrete in acidic environments*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(8): p. 637-645.
21. Gorninski, J.P., D.C. Dal Molin, and C.S. Kazmierczak, *Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(11): p. 2091-2095.

22. Sofi, M., et al., *Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs)*. Cement and Concrete Research, 2007. **37**(2): p. 251-257.
23. Wu, H.-C. and P. Sun, *New building materials from fly ash-based lightweight inorganic polymer*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 211-217.
24. Abdel-Fattah, H. and M.M. El-Hawary, *Flexural behavior of polymer concrete*. Construction and Building Materials, 1999. **13**(5): p. 253-262.
25. Bignozzi, M.C., A. Saccani, and F. Sandrolini, *New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microstructure and mechanical properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000. **31**(2): p. 97-106.
26. Bignozzi, M.C., A. Saccani, and F. Sandrolini, *New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 2. Dynamic mechanical and dielectric behavior*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. **33**(2): p. 205-211.
27. Yildirim, Y., *Polymer modified asphalt binders*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 66-72.
28. Hwang, E.-H., Y.S. Ko, and J.-K. Jeon, *Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled artificial marble waste fine aggregate*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2008. **14**(2): p. 265-271.
29. Rossignolo, J.A. and M.V.C. Agnesini, *Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete*. Cement and Concrete Research 32 3, 2002: p. 329–334.
30. Oyawa, W.O., K. Sugiura, and E. Watanabe, *Polymer concrete-filled steel tubes under axial compression*. Construction and Building Materials, 2001. **15**(4): p. 187-197.
31. Oyawa, W.O., K. Sugiura, and E. Watanabe, *Flexural response of polymer concrete filled steel beams*. Construction and Building Materials, 2004. **18**(6): p. 367-376.
32. Oyawa, W.O., *Steel encased polymer concrete under axial compressive loading: Analytical formulations*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 57-65.
33. Rodrigues, C.C., *Comportamento às Acções Cíclicas de Pilares de Betão Armado Reforçados com Materiais Compósito. Dissertação para a obtenção do grau de*

Doutor em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas, Universidade Nova de Lisboa. 2005.

34. MC, *Product Systems*. 2005/2006.
35. SIKA, *Prontuário. Catálogo de Fichas de Produto*. Edição nº7, 2007.
36. Mestre, A., et al., *Dossier Info Cortiça_Design Cork, for future, innovation and sustainability*. 2006.
37. *Corte transversal de um sobreiro*. Disponível em <http://curlygirl.no.sapo.pt/imagens/cortica.jpg>. [consultado em 29/05/2010].
38. Gil, L., *A cortiça como material de construção*. Manual Técnico. **Edição APCOR**.
39. Norma, *NP 114:1996(Ed.3) Cortiça. Granulados. Classificação e características*.
40. Norma, *NP EN 933-1 2000 - Parte 1. Ensaios para determinação das propriedades geométricas dos agregados. Análise granulométrica. Método de peneiração*.
41. ASTM-E11-09e1, *Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes*. |Book of Standards. **14.02**.
42. RECIPNEU, *Especificações técnicas. Código do produto : RA-1435, Granulado Semi-Criogénico de Borracha*. 2007.
43. RECIPNEU, *Especificações técnicas. Código do produto : DC-8000, Pó Criogénico de Borracha* 2007.